



**Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

**«Συγκριτική ανάλυση των
δυνατοτήτων εκμετάλλευσης
γεωλογικών σχηματισμών που
εμπεριέχουν σπάνιες γαίες στον
Ελλαδικό και Ευρωπαϊκό χώρο».**

Φοιτητής: Ρίτης Αθανάσιος

**Τριμελής Επιτροπή: 1. Γεώργιος Εξαδάκτυλος (Επιβλέπων)
2. Εμμανουήλ Μανούτσογλου
3. Γεώργιος Μπαράκος**

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο κύριος Στυλιανός Μαυριγιαννάκης, μέλος ειδικού τεχνικού εργαστηριακού προσωπικού του Πολυτεχνείου Κρήτης, μου έδωσε την ιδέα και με ενθάρρυνε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πεδίο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Γέωργιο Εξαδάκτυλο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο των σπάνιων γαιών. Για την υλοποίηση της ιδέας αυτής καθοριστικός ήταν ο ρόλος του Καθηγητή Εμμανουήλ Μανούτσογλου, τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, όσο και με την ιδιότητα του μέλους της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Τον ευχαριστώ επίσης για την καθοδήγηση που μου έδωσε σχετικά με την γεωλογία των σπανίων γαιών. Τον Καθηγητή Πλάτωνα Γκαμαλέτσο, τον ευχαριστώ για τις συμβουλές του, που πρόθυμα μου πρόσφερε. Ο Καθηγητής Γεώργιος Μπαράκος, ήταν ο μέντορας μου και ο άνθρωπος που με καθοδήγησε κατά την διάρκεια της εργασίας σε ότι και εάν χρειάστηκα. Τον ευχαριστώ όχι μόνο γιατί με μύησε στην ομορφιά της επιστήμης, αλλά με στήριζε ακούραστα σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη στους γονείς μου Κώστα και Μαριάννα, τον αδερφό μου Δημήτρη, τα παιδιά μου Κωνσταντίνο, Λουκά, Μαρία και την γυναίκα μου Μελίνα για την άνευ όρων αγάπη και υποστήριξή τους και γιατί με έκαναν να συνειδητοποιήσω ότι με την αυτοπεποίθηση και τη δύναμη, μπορώ να καταφέρω όλα όσα ονειρεύομαι.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Σπάνιες Γαίες (ΣΓ) με την πρόοδο της τεχνολογίας, αποκτούν διαρκώς αυξανόμενο ρόλο και σήμερα η χρήση τους είναι καθοριστική για την κατασκευή σημαντικών εφαρμογών σε πολλά επίπεδα της ανθρώπινης ζωής και πολιτισμού. Το αναδυόμενο αυτό επιστημονικό πεδίο έχει πολυδύναμο ρόλο όχι μόνο στη παγκόσμια τεχνολογία, αλλά και στην οικονομική, κοινωνική και πολιτική αλληλεπίδραση μεταξύ των κρατών του πλανήτη.

Με βάση τα παραπάνω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να εμπλουτιστεί η σχετικά φτωχή βιβλιογραφική ενημέρωση στην Ελληνική γλώσσα, και να αναδειχτούν παραδείγματα περιοχών, με δυνητική προοπτική στο πεδίο της εκμετάλλευσης, τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα. Επίσης, να τονιστεί η ανάγκη επιτάχυνσης της τεχνολογικής προόδου στην κατεύθυνση της επίλυσης προβλημάτων εξόρυξης και μεταλλουργικής επεξεργασίας των σπανίων γαιών προς όφελος της ανθρώπινης προόδου και ευημερίας και να αναδειχθούν συγχρόνως οι παράμετροι του σεβασμού στο περιβάλλον και της παγκόσμιας συνεργασίας.

Για την επίτευξη των παραπάνω, μετά από τον βιβλιογραφικό ορισμό, την ταξινόμηση των ΣΓ, την παρουσίαση του γεωλογικού και ορυκτολογικού περιβάλλοντός των, αναφέρονται οι εφαρμογές τους στη σύγχρονη ζωή, αλλά και το περιβαλλοντολογικό - οικονομικό πλαίσιο και τα κριτήρια που διέπουν την εκμετάλλευσή τους. Αναφέρεται η κατανομή των ΣΓ σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και πανελλαδικό επίπεδο. Γίνεται εμφανής ο παγκόσμιος ρόλος της Κίνας σε εξορυκτικό επίπεδο, ενώ η σχετική με τις ΣΓ τεχνολογία μεταλλουργίας που διαθέτει, την καθιστούν σημαντικό παγκόσμιο συνεργάτη στο συγκεκριμένο πεδίο. Τέλος σε δύο περιοχές στην Ευρώπη (Norra Kärr που βρίσκεται στη νοτιοκεντρική Σουηδία και το Kvanefjeld που βρίσκεται στην νότια Γροιλανδία) και σε δύο στην Ελλάδα (Παρνασσό -Γκιώνα στη Στερεά Ελλάδα και στην περιοχή Νέας Περάμου και Στρυμονικού κόλπου στη ευρύτερη περιοχή Καβάλας), μελετάται και αναλύεται η πιθανότητα εξορυκτικού οφέλους.

Συμπερασματικά, παρά τον παγκόσμια πρωταγωνιστικό ρόλο των ΣΓ στην τεχνολογία, οικονομία και πολιτική, η εξορυκτική και μεταλλουργική διεργασία στις οποίες υπόκεινται είναι αρκετά πίσω ακόμη και εξαρτώνται όχι μόνο από την σχετική τεχνολογία και τεχνογνωσία, αλλά και από περιβαλλοντολογικούς κανόνες, καθώς και από κοινωνικές και πολιτικές συμπεριφορές. Στις αναλυθείσες περιοχές στην Ευρώπη η μελλοντική εξόρυξη και εκμετάλλευση των ΣΓ επιβραδύνεται από περιβαλλοντολογικούς και οικονομικούς

περιορισμούς, ενώ στην Ελλάδα η επιπλέον πληρέστερη μελέτη της ορυκτολογίας και γεωλογίας των υποψηφίων περιοχών θα μπορούσε να αυξήσει την μελλοντική δυναμική τους στο πεδίο των ΣΓ.

ABSTRACT

Due to rapid technological progress, Rare Minerals (RM) acquire an ever increasing scope with their use being crucial in many contemporary fields of everyday life and civilization. This emerging scientific field plays a significant role in global technology, as well as financial, social and political interactions between world's nations.

Based on the above, the purpose of this thesis is to enrich the relatively poor source material available in Greek and examine European and regional areas which have potential in the field of RM exploitation. In addition to that, another goal is to emphasize the need of accelerating technological progress towards solving extraction and metallurgical process problems, for mankind's progress and prosperity while at the same time underline environmental and global cooperation parameters.

In order to achieve the above, scientific definition, classification and geological and mineralogical presentation of RM are given, as well as their applications in modern life, the environmental/financial background and the criteria concerning their exploitation. This thesis also explores RM distribution on global, European and Greek scale. China's global role as a significant partner in mining RM is emphasized with extra attention being given to its specific technology for mineral extraction. Finally, two European (Norra Kärr, located at mid-southern Sweden and Kvenefjeld at southern Greenland) and two Greek (Parnassos-Gkiona in Central Greece and Peramos/Strymonikos bay in Kavala region) areas are examined and the probability of mining potential is analyzed.

In conclusion, despite Rare Minerals' leading role in technology, economy and politics, mining and metallurgical processes which they need to undertake are not that developed yet, and they depend not only on relative technology and expertise, but also on environmental rules, as well as social and political norms. Regarding European regions analyzed in this thesis, the main reasons for setbacks are mainly environmental and financial constraints. The areas of Greece described in this thesis can have their future potential in the field of RM increased via more elaborate studies in mineralogy and geology.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT.....	4
1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Σπάνιες Γαίες	7
1.2 Κίνητρο	8
1.3 Τι Διαπραγματεύεται η Παρούσα Εργασία.....	9
2. Οι Σπάνιες Γαίες.....	10
2.1.1 Ορισμός	10
2.1.2 Γιατί ονομάζονται σπάνιες γαίες;	11
2.2 Ταξινόμηση.....	11
2.3 Γεωλογία και Ορυκτολογία	13
2.4 Ιστορία	15
2.5 Εφαρμογές	20
2.6 Οι Σπάνιες Γαίες σε Αριθμούς	25
2.6.1 Παγκόσμια Παραγωγή.....	25
2.6.2 Παγκόσμιες Τιμές και Εμπορική Κίνηση.....	26
3. Παγκόσμια Κατανομή των Σπανίων Γαιών	31
3.1.1 Παγκόσμιοι Πόροι Σπανίων Γαιών	31
3.1.2 Σημαντικότερα Έργα Εξόρυξης και Δυνητικά Έργα ΣΓ Παγκοσμίως	32
3.2.1 Προχωρημένα Έργα Και Δυνητικά Έργα Εξόρυξης στην Ευρώπη	38
3.2.2 Γροιλανδία.....	39
3.2.3 Νορβηγία	41
3.2.4 Σουηδία.....	41
3.2.5 Γερμανία	43
3.2.6 Ισπανία.....	43
3.2.7 Τουρκία.....	43
3.2.8 Υπόλοιπη Ευρώπη και κρισιμότητα	44
3.3.1 Εμφανίσεις στην Ελλάδα με «Προοπτική»	47
3.3.2 Βόρεια Ελλάδα.....	48
3.3.4 Νησιωτική Ελλάδα.....	50
3.4 Η αναγκαιότητα καθιέρωσης κριτηρίων βελτιστοποίησης των έργων εκμετάλλευσης Σπανίων Γαιών.....	50
4. Ανάλυση των Παραμέτρων Αξιολόγησης και Εκμετάλλευσης Σπανίων Γαιών.....	51
4.1 Αξιολόγηση Εξόρυξης Σπανίων Γαιών.....	51

4.2 Κατηγοριοποίηση Παραγόντων Αξιολόγησης.....	54
4.2.1. Γεωλογικοί /Γεωτεχνικοί Παράγοντες	54
4.2.2 Τεχνικοί και Λειτουργικοί Παράγοντες	56
4.2.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες και Κριτήρια Ασφάλειας	57
4.2.4 Γεωγραφικοί Παράγοντες	60
4.2.5 Οικονομικοί Παράγοντες	60
4.2.6 Κοινωνικοπολιτικοί Παράγοντες	63
4.3 Ταξινόμηση Κριτηρίων Αξιολόγησης για Εξορύξεις Σπανίων Γαιών.....	65
5. Δυνατότητες εκμετάλλευσης γεωλογικών σχηματισμών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες στον Ελλαδικό και Ευρωπαϊκό χώρο	68
5.1 Μεθοδολογία.....	68
5.2 Norra Kärr	68
5.2 Kvanefjeld	74
5.3 Παρνασσός-Γκιώνα.....	79
5.4 Καβάλα - Στρυμονικός Κόλπος	83
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

1. Εισαγωγή

1.1 Σπάνιες Γαίες

Οι Σπάνιες Γαίες (ΣΓ), διεθνώς Rare Earth Elements (REE), είναι μια κατηγορία δεκαεπτά χημικών στοιχείων τα οποία βρίσκονται υπό τη μορφή μεταλλευμάτων στον φλοιό της Γης. Από το 1800 που ανακαλύφθηκε το πρώτο ορυκτό που περιείχε σπάνιες γαίες, (ύτριο και δημήτριο ήταν τα πρώτα στοιχεία), στο χωριό Ytterby της Σουηδίας, μέχρι σήμερα, έχει αναδειχτεί σε παγκόσμιο επίπεδο η αξία των ΣΓ σε ευρείες επιστημονικές εφαρμογές, παρεμβαίνοντας έτσι καταλυτικά στο κάδρο της παγκόσμιας οικονομίας και των επιστημονικών, πολιτικών και κοινωνικών εξελίξεων(1).

Οι ξεχωριστές ιδιότητες των σπάνιων γαιών, οι οποίες οφείλονται στην ηλεκτρονική δομή των ατόμων τους, τις έχουν καταστήσει απαραίτητες στις σύγχρονες εφαρμογές, όπως η ηλεκτρονική τεχνολογία, η μεταλλουργία και η παραγωγή «πράσινης» ενέργειας, ενώ αρχίζουν να αναδύονται εφαρμογές στην βιοιατρική. Εφαρμογές όπως, οι ισχυροί μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές γεννήτριες, τα ηχεία, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τις ανεμογεννήτριες, η κατασκευή γυαλιού για οθόνες ηλεκτρονικών συσκευών, φακούς και κάτοπτρα ακριβείας, η κατασκευή οπτικών ινών και οθονών υγρών κρυστάλλων, βασίζονται στις ξεχωριστές φυσικές και χημικές ιδιότητες των στοιχείων αυτών(2).

Στη καθημερινή χρήση των ΣΓ η ποσότητα που τις συναντάμε ποικίλει. Ένα κινητό, για παράδειγμα, περιέχει περίπου μισό γραμμάριο από αυτά τα στοιχεία, ένα κλιματιστικό περίπου εκατό γραμμάρια, ενώ ηλεκτρικά αμάξια, πολεμικά αεροσκάφη, υποβρύχια, πλοία κτλ, μπορεί να χρειαστούν από μερικές δεκάδες έως περισσότερα από μερικές εκατοντάδες κιλά. Έτσι γίνεται αντιληπτό, ότι η ευρεία χρήση τους σε τεχνολογίες της καθημερινής μας ζωής, έχει εκτοξεύσει τις ανάγκες για σπάνιες γαίες(3–6).

Το βασικό πρόβλημα στην εκμετάλλευση των ΣΓ είναι η εξόρυξή τους. Παρ' όλο που το όνομα της κατηγορίας αυτών των στοιχείων υποδηλώνει σπανιότητα, οι σπάνιες γαίες στην πραγματικότητα δεν είναι σπάνιες και εντοπίζονται σε πολλές περιοχές της Γης. Η έννοια της

σπανιότητας αποδίδεται στο γεγονός της δυσκολίας του εντοπισμού κοιτασμάτων που μπορούν να αξιοποιηθούν με οικονομικά συμφέροντα τρόπο. Κάθε έτος παράγονται περίπου 280.000 τόνοι οξειδίων σπάνιων γαιών. Οι χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα είναι, κατά σειρά, η Κίνα, το Βιετνάμ, η Βραζιλία και η Ρωσία, ενώ οι μεγαλύτεροι παραγωγοί εξορύξιμων ΣΓ είναι η Κίνα, η Βιρμανία, οι Η.Π.Α και η Αυστραλία. Το 78% της παραγωγής προέρχεται σήμερα από την Κίνα(7).

Οι τεχνικές δυσκολίες, το υψηλό κόστος της εξόρυξης για να πληροί της περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και η μεταλλουργική επεξεργασία των ΣΓ είναι βασικοί λόγοι που συμβάλλουν στην «σπανιότητά» τους. Ο μεταλλουργικός τους διαχωρισμός χαρακτηρίζεται από μηχανικές και ηλεκτροχημικές διεργασίες, οι οποίες με τη σειρά τους απαιτούν τη χρήση δυνητικά επιβλαβών για το περιβάλλον χημικών ουσιών και τεράστιες ποσότητες νερού και ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικό αποτέλεσμα είναι η έκλυση τεράστιων ποσών θερμότητας και δημιουργία τόνων αποβλήτων. Η περιβαλλοντική «χαλαρότητα» που επιδεικνύεται σε κάθε χώρα επίσης συμβάλλει την ποσότητα εκμετάλλευσης των ορυκτών που περιέχουν ΣΓ. Σήμερα πιο επιτακτικά, η επιστημονική και τεχνολογική κοινότητα αναζητά τρόπους ισορροπίας, ώστε η παραγωγή και κατανάλωση σπάνιων γαιών να γίνει πιο αποδοτική. Η βελτίωση μεθόδων απομόνωσης, η ανακύκλωση των σπάνιων γαιών και η εξεύρεση τρόπων να αντικατασταθούν από άλλα στοιχεία ή να αξιοποιηθούν περισσότερο τα στοιχεία που μέχρι στιγμής δεν χρησιμοποιούνται, αποτελούν αντικείμενα έρευνας με τελικό σκοπό να συνδυαστεί το όφελος της εφαρμογής τους με τη μεγαλύτερη δυνατή περιβαλλοντική προστασία(8,9).

1.2 Κίνητρο

Κίνητρο για την παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η δυναμική του επιστημονικού πεδίου, η σχετικά φτωχή βιβλιογραφική ενημέρωση στην Ελληνική γλώσσα, και η ανάδειξη των περιοχών, με δυναμική προοπτική στο πεδίο εκμετάλλευσης στην Ευρώπη και φυσικά στην Ελλάδα. Επίσης, με τις αυξανόμενες δυνατότητες εφαρμογών των ΣΓ, αναδύεται επιτακτικά η ανάγκη επιτάχυνσης της τεχνολογικής προόδου στην κατεύθυνση της επίλυσης προβλημάτων εξόρυξης και εξαγωγής σπάνιων γαιών, προς όφελος της ανθρώπινης προόδου και ευημερίας, αναδεικνύοντας συγχρόνως την ανάγκη σεβασμού στο περιβάλλον και της παγκόσμιας συνεργασίας.

1.3 Τι Διαπραγματεύεται η Παρούσα Εργασία

Η παρούσα εργασία, εκτός από την εισαγωγή (κεφάλαιο 1^ο), αποτελείται από άλλα τέσσερα δομικά κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται ο ορισμός, η ονοματολογία, η γεωλογική σύσταση, η ιστορία, οι εφαρμογές και η παγκόσμια αγορά των ΣΓ. Στο 3^ο κεφάλαιο εξετάζουμε την κατανομή των ΣΓ στα πλαίσια της παγκόσμιας παραγωγής. Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται εργαλεία και παράμετροι με βάση τα οποία γίνεται η αξιολόγηση των σπανίων γαιών προκειμένου να εξεταστούν πιθανές δυνατότητες εκμετάλλευσής τους. Τέλος, γίνεται εστίαση σε 4 περιοχές στην Ευρώπη (Γροιλανδία, Σουηδία και 2 στην Ελλάδα), όπου αναλύονται ορυκτολογικά, γεωλογικά, οικονομικά, περιβαλλοντολογικά και κοινωνικοπολιτικά κριτήρια, με σκοπό την δυνητική μελλοντική εκμετάλλευση.

2. Οι Σπάνιες Γαίες

2.1.1 Ορισμός

Οι σπάνιες γαίες είναι μια ομάδα από 17 μεταλλικά στοιχεία του περιοδικού πίνακα, που περιλαμβάνουν τα στοιχεία Σκάνδιο (Sc), Ύτριο (Y) και 15 λανθανίδες (με ατομικό αριθμό Z από 57 έως 71), όπως ορίζεται από τη Διεθνή Ένωση Καθαρής και Εφαρμοσμένης Χημείας (International Union Pure and Applied Chemistry IUPAC, 2005)(10). Οι λανθανίδες περιλαμβάνουν τα: Λανθάνιο (La), Δημήτριο (Ce), Πρασεοδύμιο (Pr), Νεοδύμιο (Nd), Προμήθειο (Pm), Σαμάριο (Sm), Ευρώπιο (Eu), Γαδολίνιο (Gd), Τέρβιο (Tb), Δυσπρόσιο (Dy), Όλμιο (Ho), Έρβιο (Er), Θούλιο (Tm), Υτέρβιο (Yb), Λουτέτσιο (Lu). Το Ύτριο (Y, Z=39) και το Σκάνδιο (Sc, Z=21) μοιράζονται φυσικές και χημικές ιδιότητες παρόμοιες με τις λανθανίδες. Συνήθως, μόνο το ύτριο συνεξετάζεται με τις υπόλοιπες σπάνιες γαίες, λόγω του ότι βρίσκεται σε ικανές συγκεντρώσεις στις ίδιες αποθέσεις μεταλλεύματος και μοιράζεται ένα εξίσου σημαντικό μέρος της αξίας του κοιτάσματος των σπάνιων γαιών. Το σκάνδιο εξετάζεται χωριστά στην αξιολόγηση των πρώτων υλών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς προέρχεται κυρίως από κοιτάσματα βωξίτη και έχει συγκεκριμένες βιομηχανικές ιδιότητες. Όλες οι λανθανίδες εμφανίζονται στη φύση, εκτός από το προμήθειο. Αυτό το στοιχείο έχει ένα μη καθορισμένο αριθμό ασταθών ισοτόπων, με το πιο σταθερό ισότοπό του να έχει ημιπερίοδο ζωής 17,7 έτη. Το προμήθειο δεν υπάρχει στη φύση και δεν περιλαμβάνεται στην παραπάνω κατηγορία. Ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία θα γίνεται πλέον αναφορά στην ομάδα των 15 σπάνιων γαιών(11–13).

Για σκοπούς αξιολόγησης αλλά και ως προς το γεγονός ότι τείνουν να έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις είτε προς την μια ομάδα είτε την άλλη, οι σπάνιες γαίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τις Ελαφρές Σπάνιες Γαίες (ΕΣΓ) (Light Rare Earth Elements, LREE - La, Ce, Pr, Nd, Sm) και τις Βαριές Σπάνιες Γαίες (ΒΣΓ) (Heavy Rare Earth Elements, HREE - Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y)(14).

2.1.2 Γιατί ονομάζονται σπάνιες γαίες;

Ο όρος ‘σπάνιες γαίες’ σχετίζεται στενά με την ανακάλυψή τους και προτάθηκε για πρώτη φορά το 1794 από τον Johann Gadolin, Φινλανδό χημικό, φυσικό και ορυκτολόγο. Παρ’ όλο που το όνομα της κατηγορίας αυτών των στοιχείων υποδηλώνει σπανιότητα, οι σπάνιες γαίες στην πραγματικότητα εντοπίζονται σε πολλές περιοχές της Γης. Αυτά τα στοιχεία ονομάστηκαν ‘σπάνια’ επειδή θεωρήθηκαν ιδιαίτερα συγκεντρωμένα σε συγκεκριμένα λιγοστά ορυκτά όπου ήταν αρχικά απομονωμένα. Όλες οι σπάνιες γαίες, εκτός από το προμήθειο, είναι σε περισσότερη αφθονία κατά μέσο όρο από τον χρυσό, ασήμι ή πλατίνα, ενώ το δημήτριο είναι το πιο άφθονο από όλα τα σπάνια στοιχεία της γης και είναι πιο συνηθισμένο στο φλοιό της γης από το χαλκό ή το μόλυβδο. Βέβαια η σπανιότητά τους οφείλεται στον εμπλουτισμό τους στη φύση και στο να βρεθούν σε οικονομικά βιώσιμες συγκεντρώσεις για εξόρυξη και επεξεργασία. Έτσι ενώ βρίσκονται σε μεγάλη αφθονία δεν είναι πάντα οικονομικά συμφέρουσα η εκμετάλλευσή τους και ως εκ τούτου μπορεί να οδηγηθούμε σε λάθος συμπεράσματα σχετικά με την σπανιότητά τους.

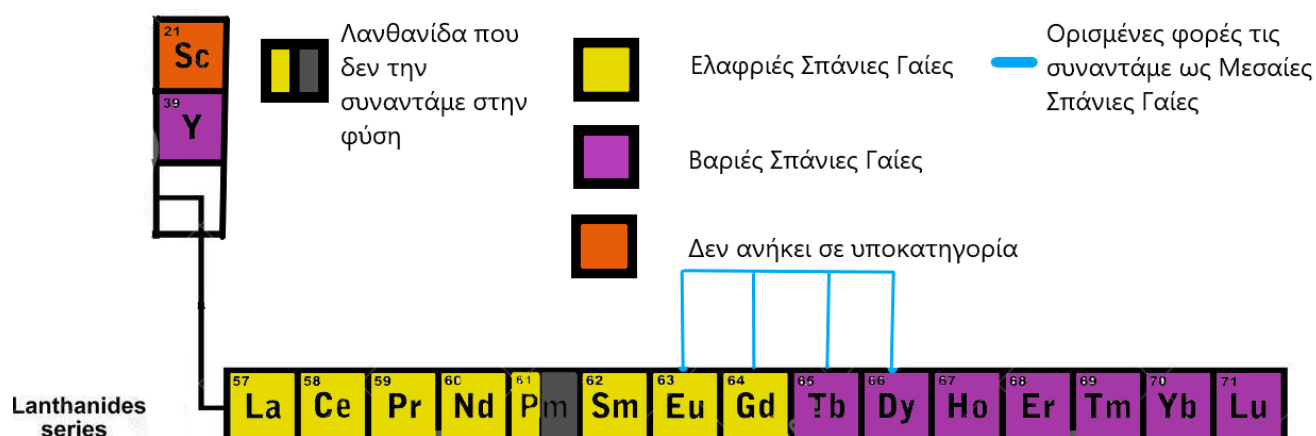
Την ονομασία ‘γαίες’ την πήραν γιατί η αρχική εξαγωγή τους έγινε υπό μορφή οξειδίων. Τα οξείδια ενός στοιχείου ονομάζονται ‘terre’ και ‘erde’ που σημαίνει γαία, αντίστοιχα στα Γαλλικά και Γερμανικά, (οι δυο αυτές γλώσσες ήταν οι κυρίαρχες τον 19^ο αιώνα στην επιστημονική κοινότητα). Επίσης σε μορφή οξειδίων οι σπάνιες γαίες έχουν μια μορφή θαμνή, ακατέργαστη και γήινη εμφάνιση.(11,15,16)

2.2 Ταξινόμηση

Με τη διαμόρφωση μιας τόσο μεγάλης ομάδας 15 στοιχείων, οι σπάνιες γαίες, όπως προαναφέρθηκε, ταξινομούνται περαιτέρω σε υποκατηγορίες ακολουθώντας τον κανόνα του αυξανόμενου ατομικού αριθμού ‘Z’. Γενικά χωρίζονται σε υποκατηγορία με στοιχεία Ελαφρών Σπάνιων Γαιών (ΕΣΓ) και υποκατηγορία με στοιχεία Βαρέων Σπάνιων Γαιών (ΒΣΓ) (Σχήμα 2.1). Επειδή οι ιδιότητες των ομάδων αυτών δεν είναι διακριτές, η ταξινόμηση γίνεται αυθαίρετα. Έτσι, από το λανθάνιο έως το γαδολίνιο ονομάζονται ΕΣΓ, ενώ από το τέρβιο μέχρι το λουτέτιο χαρακτηρίζονται ως ΒΣΓ. Λόγω της κάπως αυθαίρετης διαίρεσης αυτών των στοιχείων, μια τρίτη υποκατηγορία εισάγεται μερικές φορές εκείνη των Μεσαίων Σπάνιων

Γαιών (ΜΣΓ), στην οποία περιλαμβάνονται εκείνα τα στοιχεία μεταξύ του ευρωπαϊού και του δυσπρόσιου (Εικόνα 1).

Το ύτριο παρά τον χαμηλό ατομικό αριθμό του, συνήθως ομαδοποιείται στις ΒΣΓ λόγω της χημικής ομοιότητάς του κυρίως με το όλμιο και μερικώς με το δυσπρόσιο. Έτσι το ύτριο θα μπορούσε να τοποθετηθεί μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων. Ωστόσο, τοποθετείται ξεχωριστά από την ομάδα των σπάνιων γαιών για να τονίσει το γεγονός ότι δεν είναι μία από τις λανθανίδες (Εικόνα 1). Πολλές φορές οι σπάνιες γαίες αναφέρονται με τον όρο οξείδια σπάνιων γαιών. Αν και ο όρος χρησιμοποιείται εναλλακτικά για τον γενικό χαρακτηρισμό των σπανίων γαιών, εντούτοις η πραγματικότητα είναι ότι τα Οξείδια Σπάνιων Γαιών (ΟΣΓ) (Rare Earth Oxides-REO) είναι στοιχεία σπάνιων γαιών τα οποία διαχωρίζονται, καθαρίζονται και πωλούνται στη μορφή του οξειδίου τους. Έτσι, είναι συνηθισμένο τα αποθέματα σπάνιων γαιών να αποδίδονται με τη συντομογραφία ΟΣΓ. Οι αντίστοιχες συντομογραφίες για Ελαφρά και Βαρέα οξείδια Σπάνιων Γαιών είναι ΕΣΓ και ΒΣΓ ενώ η συντομογραφία ΣΣΓ (TREE) καθορίζει το Συνολικό άθροισμα Σπάνιων Γαιών (Total Rare Earth Elements) που υπάρχει σε μια απόθεση(11,14,15,17,18).



Εικόνα 1: Σχηματική ταξινόμηση των σπάνιων γαιών ανάλογα με την υποκατηγορία τους.

2.3 Γεωλογία και Ορυκτολογία

Οι σπάνιες γαίες δεν βρίσκονται ποτέ στην στοιχειακή τους κατάσταση στην φύση αλλά αντίθετα συνδέονται ως ομάδα σπάνιων γαιών σε ορυκτά όπου καταλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις κατιόντων, που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητα για την ταυτότητα του ορυκτού. Τα ορυκτά που περιέχουν σπάνιες γαίες κυριαρχούνται συνήθως είτε από ΒΣΓ είτε από ΕΣΓ. Δημοφιλή ορυκτά που περιέχουν κυρίως ΒΣΓ περιλαμβάνουν γαδολινίτη (gadolinite), ξενότιμο (xenotime), σαμαρσκίτη (samarskite), ευξενίτη (euxenite), φεργκουσονίτη (fergusonite), υττροτανταλίτη (yttrotantalite), υττροτουνγκσίτη (yttrotungstite), υττριαλίτη (yttrialite). Ενώ τα ορυκτά που περιέχουν κατά κύριο λόγο ΕΣΓ περιλαμβάνουν μπαστνασίτη (bastnasite), μοναζίτη (monazite), αλλανίτη (allanite), λοπαρίτη (loparite), αγκυλίτη (ancylite), παρασίτη (parasite), λανθανίτη (lanthanite), σεβινίτη (chevinite), δημητρίτη (cerite), βορικό πυριτικό άλας (stillwellite), μπριθολίτη (britholite), φθοριοδημητρίτη (fluocerite) και κερινίτη (cerianite). Περισσότερα από 200 ορυκτά είναι γνωστό ότι περιέχουν ιδιαίτερα αξιόλογες συγκεντρώσεις σπάνιων γαιών. Τα ορυκτά μοναζίτης, μπαστνασίτης, ξενότιμο, καθώς και δημητρίτης, γαδολινίτης, φεργκουσονίτης, σαμαρσκίτης και ο αλλανίτης εμφανίζουν την μεγαλύτερη περιεκτικότητα στις αποθέσεις μεταλλευμάτων σπάνιων γαιών. Ωστόσο, οι εμπορικές εκμεταλλεύσεις αποθέσεων σε όλο τον κόσμο εξάγουν κυρίως μεταλλεύματα μπαστνανίτη, μοναζίτη και ξενότιμο, διότι παρουσιάζουν το μεγαλύτερο οικονομικό ενδιαφέρον. Οι κυριότερες εμφανίσεις στην Αυστραλία περιέχουν κυρίως μοναζίτη και κάποια ξενότιμο, ενώ οι εμφανίσεις των ΗΠΑ περιέχουν κυρίως μπαστνασίτη. Στην Κίνα υπάρχουν πολλές διαφορετικές εμφανίσεις. Συγκεκριμένα, στην βόρεια Κίνα δηλαδή στην εσωτερική Μογγολία (Επαρχία της Κίνας, Inner Mongolia), υπάρχει κυρίως μπανστανίτης, ξενότιμο και μοναζίτης ενώ στην νότια Κίνα υπάρχει πολύς μοναζίτης. Μοναζίτη με περιεχόμενο σπάνιων γαιών έχει και η Ινδία και η Μαλαισία, όπως και εμφανίσεις ξενότιμου. Ο λοπαρίτης βρίσκεται στη Ρωσία όπου εξάγονται σπάνιες γαίες και ο ευδιαλίτης βρέθηκε στη Σουηδία σε αλκαλικά σύμπλοκα. Οι καταθέσεις έχουν μεγάλη διακύμανση στη σύνθεση. Αν και ο αριθμός των εμφανίσεων που έχουν ενδιαφέρον στον κόσμο μπορεί να είναι πάνω από 850, τα πραγματικά ενεργά ορυχεία λειτουργίας είναι μόνο λίγα(19). Τα ορυχεία που παράγουν σπάνιες γαίες αυτή την στιγμή στον κόσμο μετρούνται στα δάχτυλα των δυο χεριών. Κατά κύριο λόγο οι σπάνιες γαίες παράγονται στην Κίνα και συγκεκριμένα στο Bayan Obo, το οποίο είναι η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής ελαφρών σπάνιων γαιών στον κόσμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ΣΓ στο συγκεκριμένο ορυχείο είναι παραπροϊόντα σιδηρού. Στην νότια Κίνα, σε αμμώδεις εμφανίσεις

μοναζίτη βρίσκεται η μεγαλύτερη πηγή παραγωγής βαριών σπάνιων γαιών στον κόσμο. Το Mountain Pass στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ παράγει ελαφρές σπάνιες γαίες, όπως και το Mount Weld στην Αυστραλία. Παρόλο που στην Ευρώπη υπάρχουν κάποιες ενδιαφέρουσες γεωλογικές καταθέσεις, δεν υπάρχουν ενεργά ορυχεία μέσα στην ευρωπαϊκή ένωση. Τα πιο σημαντικά ορυκτά με σπάνιες γαίες αναφέρονται στον Πίνακα 1(20–23).

Πίνακας 1 : Σημαντικά ορυκτά που περιέχουν σπάνιες γαίες(23).

Ορυκτά Ανθρακικά και φθορανθρακικά	Χημική Σύσταση	K.M.% ΟΣΓ	Άλλη παράλλαξη ΣΓ
Ancylite (Ce)	$\text{SrCe}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$	43	La
Bastnäsite (Ce)	CeCO_3F	75	La, Nd, Y
Huanghoite (Ce)	$\text{BaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$	40	
Parisite (Ce)	$\text{CaCe}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$	50	Nd
Synchysite (Ce)	$\text{CaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$	51	Nd,Y
Φωσφορικά Άλατα			
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	-	
Cheralite	$\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$	Μεταβλητά	
Churchite (Y)	$\text{YPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	51	Nd
Florencite (Ce)	$(\text{Ce})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	32	Sm
Monazite (Ce)	CePO_4	70	La, Nd, Sm
Xenotime (Y)	YPO_4	61	Yb
Οξειδία			
Aeschynite (Ce)	$(\text{Ce,Ca, Fe, Th})(\text{Ti,Nb})_2(\text{O,OH})_4$	32	Nd, Y
Cerianite (Ce)	CeO_2	100	
Loparite (Ce)	$(\text{Ce, La, Nd, Ca,Sr})(\text{Ti, Nb})\text{O}_3$	30	
Yttrpyrochlore (Y)	$(\text{Y,Na,Ca,U})_{1-2}\text{Nb}_2(\text{O,OH})$	17	
Πυριτικά			
Allanite (Ce)	$\text{CaNdAl}_2\text{Fe}_2+(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	23	La, Nd, Y
Britholite (Ce)	$(\text{Ce,Ca,Sr})_2(\text{Ce,Ca})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{O,OH,F})$	23	Y
Eudialyte	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O,OH,H}_2\text{O})(\text{Cl,OH})_2$	9	
Fergusonite (Ce)	$\text{CaNdAl}_2\text{Fe}_2+(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	53	Nd, Y
Gadolinite (Ce)	$\text{Ce}_2\text{Fe}_2+\text{Be}_2\text{O}_2(\text{SiO}_4)_2$	60	Y
Gerenite (Y)	$\text{CaNdAl}_2\text{Fe}_2+(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$	44	
Kainosite (Y)	$\text{Ca}_2\text{Y}_2(\text{SiO}_3)_4(\text{CO}_3)\text{H}_2\text{O}$	38	
Keiviite	$\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_2$	69	Yb
Steenstrupine (Ce)	$\text{Na}_{14}\text{Ce}_6(\text{Mn}^{2+})_2(\text{Fe}^{3+})_2\text{Zr}(\text{PO}_4)_7\text{Si}_{12}\text{O}_{36}(\text{OH})_{23}\text{H}_2\text{O}$	31	
Φθοριούχα			
Fluocerite (Ce)	CeF_3	83	La

Οι σπάνιες γαίες εμφανίζονται σε πλήθος ορυκτών που κυμαίνονται από απλά φωσφορικά και ανθρακικά άλατα έως πολύ σύνθετα πυριτικά άλατα. Η κατανομή και συγκέντρωση των ορυκτών αυτών επηρεάζονται από διάφορες γεωλογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένου του εμπλουτισμού σε μαγματικά συστήματα ή υδροθερμικά υγρά και επακόλουθη ανακατανομή και συγκέντρωση μέσω καιρικών συνθηκών. Οι αποθέσεις σπάνιων γαιών είναι γνωστές σε πύρινο και υδροθερμικό περιβάλλον καθώς και ιζηματογενείς και υπολειμματικές αποθέσεις, όπως θαλάσσιοι και αλλουβιακοί, άργιλοι προσρόφησης ιόντων και λατερίτες(24).

2.4 Ιστορία

Η ιστορία των σπάνιων γαιών ξεκινά το 1788 στη Σουηδία και χωρίζεται σε τέσσερις περιόδους μέχρι και σήμερα.

- Η πρώτη περίοδος ξεκινάει από το 1788 μέχρι το 1891. Είναι η προκαταρκτική περίοδος κατά την οποία τα στοιχεία των σπάνιων γαιών εξετάστηκαν επιστημονικά, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν ακόμη τεχνικά.
- Η δεύτερη περίοδος, μεταξύ του 1891 μέχρι το 1930, είναι η περίοδος της πρώτης βιομηχανικής χρήσης των μικτών ή απλά διαχωρισμένων στοιχείων των σπάνιων γαιών.
- Η τρίτη περίοδος από το 1930 μέχρι και το 1960, είναι η αρχή της ευρείας χρήσης των ιδιοτήτων των στοιχείων των σπάνιων γαιών. Συγκεκριμένα η περίοδος από το 1940 μέχρι το 1960 χαρακτηρίζεται από τη συστηματική ανακάλυψη ιδιοτήτων, μεθόδων διαχωρισμού και χρήσης των στοιχείων των σπάνιων γαιών, ως υποπροϊόν των διαφόρων ατομικών ερευνητικών προγραμμάτων στις βιομηχανικές χώρες, κυριότερες από τις οποίες είναι η ΗΠΑ και η Αγγλία.
- Η τέταρτη και τελευταία περίοδος από το 1960 έως σήμερα, είναι η εποχή των ποιοτικά και ποσοτικά ταχέως αυξανόμενων εφαρμογών των στοιχείων των σπάνιων γαιών που είναι τώρα άφθονα διαθέσιμα σε κάθε επιθυμητή ποιότητα, αν και δεν διατίθενται πάντα σε χαμηλή τιμή.

Στην προκαταρκτική περίοδο, το 1788, ένας ερασιτέχνης χημικός/γεωλόγος ο Carl Axel Arrhenius βρήκε στο Ytterby της Σουηδίας ένα μαύρο ορυκτό το οποίο τότε ονόμασε υτερμπίτη

(ytterbite) λόγω της περιοχής που είχε βρεθεί αλλά αργότερα ονομάστηκε γαδολινίτης, επειδή το εν λόγω ορυκτό μελετήθηκε το 1794 από τον καθηγητή Gadolin, από το οποίο πήρε και την ονομασία του, στο Πανεπιστήμιο του Abo, στο Turku της Φινλανδίας. Ο Gadolin διαπίστωσε ότι το 38 % περίπου του πετρώματος περιείχε μια άγνωστη «γαία» που σήμερα είναι γνωστή ως οξείδιο του υτρίου. Το νέο είδος στοιχείων ονομάστηκε «σπάνιες γαίες». Το 1803 ο Klaproth και ανεξάρτητα ο Berzelius βρήκαν σε ένα εγκαταλελειμμένο ορυχείο σιδηρομεταλλεύματος στο Bastnas, επίσης στη Σουηδία, ένα ορυκτό που έλαβε το όνομα μπαστνασίτης (Bastnasite). Το 1839 ο Mosander ξεκίνησε για πρώτη φορά συστηματικά την ανάλυση των μικτών σπάνιων γαιών. Αυτό το έργο του διαχωρισμού των στοιχείων προωθήθηκε από αρκετούς επιστήμονες και πέτυχε ιδιαίτερα χρήσιμα αποτελέσματα μέσω του έργου των Bunsen και Kirchhoff, οι οποίοι εισήγαγαν τη φασματοσκοπία ως χρήσιμο όργανο ελέγχου για το διαχωρισμό των στοιχείων σπάνιων γαιών. Μέχρι το έτος 1890, πολλοί ερευνητές με διάσημα ονόματα ασχολήθηκαν με τα στοιχεία των σπάνιων γαιών και παρουσίασαν ενδιαφέρον έργο. Ένας από αυτούς ήταν και ο αυστριακός Carl Auer von Welsbach. Το 1885, ο Auer von Welsbach έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την ανάπτυξη του λαμπτήρα αερίου, το οποίο ονόμασε Auerlicht, χρησιμοποιώντας ένα χημικό μείγμα το Actinophor, που περιέχει 60% οξείδιο μαγνησίου, 20% οξείδιο του λανθανίου και 20% οξείδιο του υτρίου. Αυτοί οι αρχικοί λαμπτήρες έδωσαν ένα πράσινο χρώμα και δεν ήταν πολύ επιτυχημένοι. Έτσι η πρώτη Αμερικάνικη εταιρεία που δημιουργήθηκε για να τα πουλήσει, απέτυχε το 1889, κάτι που έκανε αβέβαιο το μέλλον των σπάνιων γαιών εφόσον δεν είχαν εφαρμογή ή βιομηχανική χρήση μέχρι τότε. Όμως το 1890 εισήγαγε μια νέα μορφή λαμπτήρα με βάση ένα μείγμα 99% διοξειδίου του θορίου και 1% οξειδίου του δημητρίου, το οποίο ανέπτυξε σε συνεργασία με τον συνάδελφό του Ludwig Haitinger. Αυτά αποδείχθηκαν τόσο πιο στιβαρά όσο και πιο «λευκά».

Το 1891 ίδρυσε μια άλλη εταιρεία για την παραγωγή αυτού του νεότερου λαμπτήρα, σε συνεργασία με συναδέλφους φοιτητές του πανεπιστημίου Ignaz Kreidl. Η χρήση του εξαπλώθηκε γρήγορα σε όλη την Ευρώπη σηματοδοτώντας έτσι το πέρας στην δεύτερη περίοδο (1891-1930). Οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες ήταν ανώτεροι από τους ηλεκτρικούς λαμπτήρες για αρκετές δεκαετίες. Μέχρι το έτος 1935, επειδή ήταν πιο οικονομικοί, περίπου 5 δισεκατομμύρια λαμπτήρες πυρακτώσεως είχαν παραχθεί και χρησιμοποιηθεί στον κόσμο. Ως αποτέλεσμα, αυτή η πρώτη χρήση των σπάνιων γαιών υπήρξε μια μεγάλη οικονομική επιτυχία χάρη στις ικανότητές του Auer von Welsbach. Στην ανάφλεξη, οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως ήταν πολύ ανώτεροι από τα λαμπτήρες Auer. Αλλά αυτή η κατάσταση

βελτιώθηκε το 1903 όταν απένειμαν στον von Welsbach δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα πυροφορικό κράμα μετάλλου ("flintstone") αποτελούμενο από 70% mischmetal και 30% σίδηρο. Μετά την ανακάλυψη των πυροφορικών κραμάτων, των λεγόμενων Auer-μετάλλων, το κύριο πρόβλημα ήταν η παραγωγή mischmetal. Για την επίλυση του προβλήματος, ο Auer von Welsbach ίδρυσε το 1907 το Treibacher Chemische Werke στα δωμάτια ενός σιδεράδικου. Έτσι το 1908, για πρώτη φορά, κατάφερε να παράγει mischmetal χωρίς πόρους με ηλεκτρόλυση συντηγμένου αλατιού με αποτέλεσμα την παραγωγή 800 κιλών του κράματος (25–27). Στα 22 χρόνια μεταξύ 1908 και 1930 παράχθηκαν περίπου 30.000 τόνοι οξειδίων σπάνιων γαιών από τα οποία καταναλώθηκαν όχι πολύ παραπάνω από το 10%.

Η τρίτη περίοδος χωρίζεται σε δυο διαστήματα. Στο διάστημα μεταξύ 1930 και 1940 που πραγματοποιήθηκαν εργασίες σε διάφορες εφαρμογές για τις σπάνιες γαίες. Μερικές από αυτές είναι η παραγωγή γυαλιών ηλίου, τα Neophan, και η αντικατάσταση των οξειδίων σιδήρου από οξείδια σπάνιων γαιών στα μέσα στίλβωσης. Επίσης η χρήση οξειδίου του δημητρίου για αποχρωματισμό του γυαλιού, καθαρό οξείδιο δημητρίου ως αδιαφανοποιητής σε κεραμικά τζάμια και χρήση του δημητρίου για την καταπολέμηση της ναυτίας. Όλες αυτές οι εφαρμογές, ωστόσο, είχαν σχετικά μικρή χρήση κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβατικής περιόδου σε σύγκριση με τις μεγάλες ποσότητες σπάνιων γαιών που καθίστανται συνεχώς διαθέσιμες από το 1940 και έπειτα. Όπως για παράδειγμα, η χρήση του ThCl ως καταλύτη σε εργοστάσια παραγωγής βενζίνης από την Fischer-Tropsch. Μετά από μερικά χρόνια, οι καταλύτες από ThO₂ αντικαταστάθηκαν από MgO. Αυτή η ανισορροπία αυξήθηκε κατά πολύ τη δεκαετία του '50 αρχικά στις ΗΠΑ και την Αγγλία και αργότερα σε άλλες χώρες καθώς πραγματοποιήθηκαν σημαντικά προγράμματα για τη χρήση της ατομικής ενέργειας. Οι μεγάλες αγορές αποθεμάτων θορίου που χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδοσία πυρηνικών αντιδραστήρων (breeder) άφησαν στα τέλη της δεκαετίας του '50 με αρχές της δεκαετίας του '60, τεράστιες ποσότητες υποπροϊόντων σπάνιων γαιών. Η τελευταία περίοδος ξεκινάει από το 1960 εξαιτίας των μεγάλων ερευνητικών ιδρυμάτων όπως το κέντρο σπάνιων γαιών στο Ames/Iowa. Με βάση την ερευνητική δραστηριότητα αυτού του επιστημονικού ιδρύματος, το οποίο τα επόμενα χρόνια διευρύνθηκε περαιτέρω, σημειώθηκε από το 1960 μέχρι σήμερα μια ευρεία χρήση των στοιχείων των σπάνιων γαιών με εκθετικά αυξημένη κατανάλωση. Ήταν και η περίοδος που πυροδότησε τη ζήτηση για στοιχεία σπάνιων γαιών, όπως το europium, το terbium και το ύτριο που χρησιμοποιήθηκαν το 1965 για να κατασκευάσουν τις έγχρωμες οθόνες των τηλεοράσεων. Το ορυχείο στο Mountain Pass στην Καλιφόρνια άρχισε να παράγει ευρώπιο από μπαστνασίτη και σταδιακά έγινε ο μεγαλύτερος παραγωγός σπάνιων γαιών στον κόσμο. Κατά τη διάρκεια

αυτής της περιόδου, η παγκόσμια παραγωγή ΟΣΓ υπερδεκαπλασιάστηκε. Από 6.900 τόνους το 1965 σε 76.600 τόνους έως το 1998, τοποθετώντας τις Η.Π.Α. στην ηγετική θέση στην παγκόσμια παραγωγή των σπάνιων γαιών. Η Κίνα ξεκίνησε την παραγωγή οξειδίων σπάνιων γαιών στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και έγινε η κορυφαία παραγωγός παγκοσμίως στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Εκμεταλλευόμενη το πλούσιο σε σπάνιες γαίες υπέδαφος η κινεζική κυβέρνηση εφάρμοσε μια καλά μελετημένη, προσεκτικά σχεδιασμένη και δυναμική μακροπρόθεσμη στρατηγική μέσω διαφόρων σχεδίων. Το 1986 ξεκίνησε το κρατικό σχέδιο ανάπτυξης υψηλής τεχνολογίας, γνωστό ως «Πρόγραμμα 863». Ακολουθώντας την ίδια στρατηγική, το 1997 εφαρμόστηκε επίσης το Εθνικό Βασικό Πρόγραμμα Έρευνας γνωστό ως «Πρόγραμμα 973». Μέσα στη δεκαετία του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η Κίνα ενίσχυσε σταθερά την παγκόσμια αγορά ΣΓ, ενώ το ορυχείο Mountain Pass και πολλοί άλλοι παραγωγοί σε ολόκληρο τον κόσμο δεν ήταν σε θέση να ανταγωνιστούν τις χαμηλές τιμές της Κίνας. Το Mountain Pass σταμάτησε τις δραστηριότητες εξόρυξης το 1998 και το ορυχείο έκλεισε εντελώς το 2002, ως απάντηση τόσο στους περιβαλλοντικούς περιορισμούς όσο και στις χαμηλές τιμές των σπάνιων γαιών. Την ίδια στιγμή, η παγκόσμια ζήτηση για σπάνιες γαίες άρχισε να ανεβαίνει στα ύψη καθώς χρησιμοποιούνταν σε ποικίλες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων αμυντικών, αεροπορικών, βιομηχανικών και καταναλωτικών ηλεκτρονικών προϊόντων.

Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα, εξαιτίας της κινεζικής στρατηγικής, σε συνδυασμό με τα χαλαρά περιβαλλοντικά μέτρα, την χαμηλή φορολογία και την φθηνή εργασία να αποδώσει γρήγορα κέρδη και οι επιχειρήσεις στην Κίνα κατάφεραν να εδραιωθούν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Στα πρώτα χρόνια και μέχρι την εδραίωση του μονοπωλίου της σε παγκόσμιο επίπεδο η Κίνα πωλούσε σπάνιες γαίες σε μορφή, οξειδίων, καθαρών μετάλλων αλλά και κραμάτων σε τιμές που ικανοποιούσαν απολυτά το παγκόσμιο αγοραστικό κοινό. Όμως σταδιακά από το 2007 η Κίνα άρχισε να εφαρμόζει περιορισμούς στις εξαγωγές της. Μέχρι το 2009, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής των ΗΠΑ είχαν αρχίσει να ανησυχούν για το εάν αυτό θα είχε μεγαλύτερες επιπτώσεις στην οικονομία και την εθνική ασφάλεια. Το κινεζικό εμπάργκο κατά της Ιαπωνίας το 2010, το οποίο κατά την επίσημη εκδοχή έγινε με αφορμή την σύγκρουση ενός κινεζικού ψαροκάικου και 2 σκαφών του λιμενικού της Ιαπωνίας στην γκρίζα θαλάσσια ζώνη κοντά στα αμφιλεγόμενα νησιά, ουσιαστικά επαλήθευσε αυτές τις ανησυχίες και προειδοποίησε τον δυτικό κόσμο. Το εμπάργκο που έγινε αρχικά στην Ιαπωνία ήταν καθολικό και φυσικά περιλάμβανε τις σπάνιες γαίες που είναι πολύ κρίσιμες για την ευρέως γνωστή υψηλή τεχνολογική ανάπτυξη της Ιαπωνίας. Ωστόσο σε σύντομο χρονικό διάστημα

επιβλήθηκαν όρια στις εξαγωγές των ΣΓ για τις υπόλοιπες χώρες του κόσμου. Ως αποτέλεσμα αυτής της αβεβαιότητας και ως απάντηση στο διάδοση ανησυχητικών ειδήσεων, οι τιμές των σπάνιων γαιών αυξήθηκαν κατακόρυφα στα μέσα του 2011. Βέβαια οι τιμές για όλα τα στοιχεία στην συνέχεια μειώθηκαν σημαντικά και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (έξι μήνες), αλλά η Κίνα είχε αποδείξει με επιτυχία τη δύναμη που συνοδεύει ο μονοπωλιακός έλεγχος μιας σημαντικής κατηγορίας πρώτων υλών. Παρ' όλα αυτά, η έκρηξη των τιμών προκάλεσε μια φρενίτιδα ανακάλυψης νέων αποθέσεων σπάνιων γαιών σε ολόκληρο τον πλανήτη. Πολλοί πιθανοί παραγωγοί σπάνιων γαιών επέμειναν να πιστεύουν ότι κρατούσαν το κλειδί της επιτυχίας, και επιτυχία σήμαινε ότι θα παρήγαγαν σημαντικές ποσότητες σπάνιων γαιών, οπότε θα έλυναν το πρόβλημα της προσφοράς και ζήτησης σπάζοντας το μονοπώλιο της Κίνας. Μερικές εταιρείες εξόρυξης είχαν ενεργήσει αρκετά γρήγορα και ευκαιριακά για να ξεκινήσουν εργασίες εξόρυξης σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το αναμενόμενο. Το 2012, η Molycorp επανενεργοποίησε το μοναδικό ορυχείο σπάνιων γαιών εντός των ΗΠΑ, στο Mountain Pass στην Καλιφόρνια. Ταυτόχρονα, η Lynas Corporation στο Mount Weld της Αυστραλίας άρχισε να λειτουργεί το εργοστάσιο σπάνιων γαιών προκειμένου να επεξεργαστεί ποσότητα 773.300 τόνων, των οποίων η εξόρυξη και η αποθήκευση ήδη είχε αρχίσει από το 2008. Παρά την πολλά υποσχόμενη ευκαιρία, η κατάσταση έγινε πολύ άσχημη, ειδικά για τη Molycorp, η οποία πτώχευσε στα μέσα του 2015 και διέκοψε όλες τις εξορυκτικές δραστηριότητες. Εκτός από αυτό, η Lynas αντιμετώπισε παρόμοια προβλήματα και θα είχε αποτύχει αν δεν γινόταν η ανακεφαλαιοποίηση της εταιρείας το 2014 βασιζόμενη σε Ιαπωνικά κεφάλαια. Σήμερα η Lynas είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός εκτός της Κίνας και προσπαθεί να γίνει ο μεγάλος ανταγωνιστής, ενώ άλλοι μη κινεζικοί παραγωγοί σπάνιων γαιών στην Ινδία, τη Ρωσία, τη Μαλαισία και την Ταϊλάνδη έχουν περιορισμένο μερίδιο στην παγκόσμια αγορά. Σε αυτό το διάστημα η κινεζική κυβέρνηση έκανε ποσοστιαίες εξαγωγές τόσο για τοπικές όσο και για ξένες εταιρείες εξαγωγής σπάνιων γαιών. Το 2012 ΗΠΑ, ΕΕ και η Ιαπωνία προσέφυγαν στον Παγκόσμιο Οργανισμό Εμπορίου (ΠΟΕ) πετυχαίνοντας μερική πτώση των τιμών. Βέβαια μετά την απόφαση του ΠΟΕ κατά της Κίνας το 2014, το αποτέλεσμα ήταν μεγαλύτερη πτώση των τιμών το 2015. Η τρέχουσα κατάσταση θα μπορούσε να περιγραφεί ως προσωρινά σταθερή, αλλά αδιαφανής και εύθραυστη(11,28,29).

2.5 Εφαρμογές

Οι σπάνιες γαίες άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μετά το 1890 στην κατασκευή λαμπτήρων. Καθώς οι τεχνολογικές εφαρμογές των σπανίων γαιών έχουν πολλαπλασιαστεί τις τελευταίες δεκαετίες και έχουν γίνει εκατοντάδες, η ζήτηση για αρκετές από τις λιγότερο άφθονες και παλαιότερα αρκετά ασαφείς σπάνιες γαίες έχει αυξηθεί δραματικά. Οι ποικίλες πυρηνικές, μεταλλουργικές, χημικές, καταλυτικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες των σπανίων γαιών έχουν οδηγήσει σε μια ολοένα αυξανόμενη ποικιλία εφαρμογών σε πολλούς τομείς (3,30,31), οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- Στην **κατάλυση**, τα οξειδία σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται ως καταλυτές σε πυρόλυση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου ή άλλων ρευστών με ποσοστό 72% και καταλυτές αυτοκινήτων με ποσοστό 28%. Οι σπάνιες γαίες που έχουν χρήση στην κατάλυση είναι το οξείδιο του λανθανίου, το οξείδιο του δημητρίου, το οξείδιο του νεοδυμίου και το οξείδιο του πρασεοδυμίου(3).
- Στην **υαλουργία**, εφόσον τα οξειδία των σπανίων γαιών προστίθενται στο γυαλί για να δώσουν ιδιότητες όπως η απορρόφηση υπεριώδους φωτός, στην μεταβολή του διαθλαστικού δείκτη, στον χρωματισμό και στον αποχρωματισμό. Το ύτριο χρησιμοποιείται μαζί με τον γρανάτη και το αλουμίνιο για τον σχηματισμό λέιζερ (YAG) ενώ το νεοδύμιο και άλλες σπάνιες γαίες εκτός από την παραγωγή χρησιμοποιούνται και ως προσμίξεις για να μεταβάλλουν τις ιδιότητες του λέιζερ YAG(32).
- Στην **στίλβωση**, με την παραγωγή κόνεων στίλβωσης που χρησιμοποιούνται για στίλβωση οθονών καθοδικού σωλήνα, οθόνες πλάσμα και σε οθόνες υγρών κρυστάλλων όπως και σε άλλες πολλές περιπτώσεις (σκληρών δίσκων υπολογιστών, παράθυρα αυτοκινήτων). Μια σημαντική μαζική εφαρμογή είναι η χρήση του οξειδίου του δημητρίου ως σκόνης στίλβωσης γυαλιού(33).
- Στην **μεταλλουργία**, έχουν σημαντική θέση γιατί προστίθενται σε αλουμίνιο, σίδηρο, χάλυβα και σε άλλα μέταλλα, πάντα σε μικρές ποσότητες με αποτέλεσμα να βελτιωθούν επιλεγμένες φυσικές ιδιότητες από την δημιουργία των καινούργιων κραμάτων. Οι σπάνιες γαίες ενσωματώνονται σε σιδηροκράματα, σε κύρια κράματα στο mischmetal (μείγμα κυρίως οξειδίου του λανθανίου και του δημητρίου) αλλά και σε μέταλλα. Τα

οξειδία που συναντάμε κυρίως είναι το οξείδιο του δημητρίου , το οξείδιο λανθανίου, το οξείδιο του νεοδυμίου και το οξείδιο πρασεοδύμιου με ποσοστό(34).

- Στα **κεραμικά**, για την επεξεργασία των χρωμάτων στα κεραμικά τζάμια. Επίσης η σκόνη από βάριο και τιτάνιο, η οποία χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, όταν επεξεργάζεται μαζί με ΣΓ τροποποιεί τις ιδιότητες του τιτανίου. Το ύτριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φερριτών υψηλών συχνοτήτων και για τη σταθεροποίηση του ζirkονίου στους αισθητήρες οξυγόνου. Οι σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται στα κεραμικά, είναι το οξείδιο του υτρίου, το οξείδιο του λανθανίου, το οξείδιο του δημητρίου, το οξείδιο του νεοδυμίου και το οξείδιο του πρασεοδύμιου(34).
- Σε **μαγνήτες**, και συγκεκριμένα σε μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου, εξαιτίας της ανώτερης πυκνότητας μαγνητικής ροής, οι ΣΓ έχουν μεγάλη ζήτηση για μικρούς και μεγάλους κινητήρες και γεννήτριες. Ενώ τα οξειδία σπάνιων γαιών που χρησιμοποιούνται από το περισσότερο προς το λιγότερο είναι το οξείδιο του νεοδυμίου, το οξείδιο του πρασεοδύμιου οξείδιο του δυσπροσίου , οξείδιο του γαδολινίου και οξείδιο του τέρβιου σε μικροποσότητες(34).
- Σε **μπαταρίες**, οι οποίες έχουν υλικά από οξειδία σπάνιων γαιών, όπως οι μπαταρίες υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH). Το αρνητικό ηλεκτρόδιο των μπαταριών περιλαμβάνει μια ποικιλία υλικών των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η αποθήκευση υδρογόνου εντός του πλέγματος του ηλεκτροδίου. Οι μισές και παραπάνω μπαταρίες NiMH χρησιμοποιούνται σε υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα(35).
- Σε **φωσφόρους** σπάνιων γαιών οι οποίοι βρίσκονται ως στρώμα στο εσωτερικό του γυάλινου τοιχώματος των λαμπτήρων φθορισμού ή λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας CFL. Οι φώσφοροι των λαμπτήρων μετατρέπουν την υπεριώδη εκπομπή του πλάσματος εκκένωσης ευγενών αερίων - υδραργύρου σε ορατό «λευκό» φως. Οι φώσφοροι είναι υπεύθυνοι για σχεδόν όλο το ορατό φως που παράγεται από τη λάμπα, επειδή οι ορατές γραμμές υδραργύρου συμβάλλουν μόνο σε μικρό ποσοστό στη συνολική απόδοση φωτός της λάμπας(36).
- Σε άλλους τομείς, όπως στην **ιατρική** οι σπάνιες γαίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, λόγω των μοναδικών τους ιδιοτήτων, όπως η ακτινοβολία και ο μαγνητισμός, που επιτρέπουν τη χρήση τους σε πολλές διαφορετικές θεραπευτικές και διαγνωστικές διαδικασίες. Μια από αυτές είναι νανοσωματίδια δομημένα με βάση το οξείδιο του δημητρίου (nanoceria), που έχουν εφαρμογή ή υπόσχονται νέες εφαρμογές σε παθολογικές

καταστάσεις. Η αναστολή δράσης των βλαπτικών ελευθέρων ριζών οξυγόνου (ROS, Reactive Oxygen Species), ως βασικού κυτταρικού μηχανισμού αντιοξειδωτικής δράσης της γαίας αυτής ανοίγουν νέες ερευνητικές προκλήσεις στην χάραξη θεραπευτικών στρατηγικών. In vitro, ζωικά, και in silico πειραματικά μοντέλα υποδηλώνουν την δυναμική και το κοντινό μέλλον του οξειδίου του δημητρίου για την αντιμετώπιση της φλεγμονής σε νεοπλασίες, ανοσολογικού τύπου αντιδράσεις και ίνωση, ενώ πρόσφατα και αρκετά επίκαιρα πιθανολογείται η χρησιμότητά του στην αντιμετώπιση της καταστροφικής φλεγμονής στη COVID-19(37,38). Στον **στρατιωτικό** τομέα οι σπάνιες γαίες ενσωματώνονται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές και τεχνολογίες, από γυαλιά νυχτερινής όρασης έως συστήματα καθοδήγησης πυραύλων, που περιέχουν δυσπρόσιο τέρβιο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο και samarium(6,39). Στην **γεωργία** για την παρασκευή λιπασμάτων. Στην **έρευνα**, καθώς ορυκτά που περιέχουν στοιχεία σπανίων γαιών χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωχρονολογήσεις, και σε πολλούς ακόμα τομείς(2,40).

Αξίζει να παρατηρήσουμε ενδεικτικά την χρήση σπανίων γαιών ανά ποσοστό στον κάθε τομέα (Πίνακας 2) και το ποσοστό χρήσης από την κάθε σπάνια γαία (Πίνακας 3). Βέβαια τα παρακάτω ποσοστά αλλάζουν σχετικά από χρονιά σε χρονιά εξαιτίας της δυναμικής αγοράς των σπανίων γαιών και του ολοένα αυξανόμενου αριθμού εφαρμογών στις οποίες βρίσκουν χρήση(30). (Εικόνα 2 και 3)

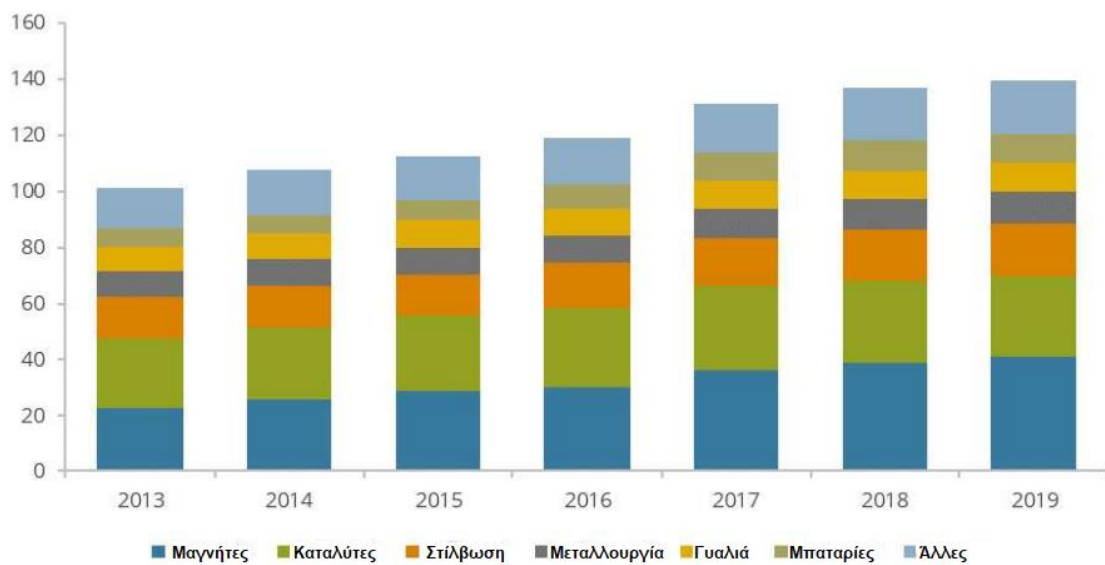
Πίνακας 2:Εκτιμώμενη παγκόσμια κατανάλωση σπανίων γαιών ανά εφαρμογή(30).

Κατάλυση	24%
Υαλουργία	7%
Στίλβωση	12%
Μεταλλουργία	8%
Κεραμικά	6%
Μαγνήτες	23%
Μπαταρίες	8%
Φώσφοροι	3%
Άλλοι	9%

Πίνακας 3: Εκτιμωμένη παγκόσμια κατανάλωση σπανίων γαιών ανά στοιχείο(30).

Ce	39,5%
La	26,4%
Nd	19,9%

Y	7,1%
Pr	4,1%
Gd	1,1%
Dy	0,7%
Sm	0,3%
Eu	0,2%
Tb	0,2%
Άλλες	0,5%



Εικόνα 2:Διάγραμμα παγκόσμιας ζήτησης σπανίων γαιών ανά εφαρμογή από το 2013-2019 σε τόνους ΟΣΓ (Roskill 2019)



Εικόνα 3:Διάγραμμα παγκόσμιας κατανάλωσης σπανίων γαιών ανά στοιχείο από το 2013-2019 σε τόνους ΟΣΓ (Roskill 2019)

Οι σπάνιες γαίες είναι κυριολεκτικά παντού, από τα smartphone έως και την διύλιση πετρελαίου και από τις πράσινες τεχνολογίες έως τα κεραμικά με τις εφαρμογές του κάθε στοιχείου (πίνακας 4). Αλλά ο λόγος που ο κόσμος δεν συνειδητοποιούσε την σημασία τους πριν από το 2010 είναι επειδή δεν έκανε αγορές απευθείας από αυτές. Οι σπάνιες γαίες έχουν στοιχεία κρυμμένα σε πολλά gadget που χρησιμοποιούμε. Εκτός από αυτό, οι ΣΓ σπάνια χρησιμοποιούνται μόνες τους ή ως κύριο υλικό, ενώ χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρές ποσότητες. Δεν μπορεί να υπάρχει κόσμος υψηλής τεχνολογίας χωρίς ΣΓ, όχι επειδή είναι αναντικατάστατες αλλά επειδή κάνουν τα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας να είναι μικρότερα, ταχύτερα και πιο ισχυρά(11).

Πίνακας 4: Κύριες βιομηχανικές εφαρμογές των ΣΓ (30)

ΣΓ(Σ)	Ταξινόμηση	Αφθονία στον φλοιό της γης(ανά εκατομμύριο)	Εφαρμογές
Λανθάνιο(La)	Ελαφριά	5-39	Κράματα μπαταριών, κράματα μετάλλων, καταλύτες αυτοκινήτων, διύλιση πετρελαίου, σκόνες στίλβωσης, πρόσθετα γυαλιού, φωσφόροι, κεραμικά, οπτικά.
Δημήτριο(Ce)	Ελαφριά	20-70	Κράματα μπαταριών, κράματα μετάλλων, αυτόματοι καταλύτες (έλεγχος εκπομπών), διύλιση πετρελαίου, σκόνες στίλβωσης, πρόσθετα γυαλιού, κεραμικά, φωσφόροι, χρωστικές ουσίες, φίλτρα UV.
Πρασεοδύμιο(Pr)	Ελαφριά	3.5-9.2	Κράματα μπαταριών, κράματα μετάλλων, καταλύτες αυτοκινήτων, σκόνες στίλβωσης, πρόσθετα γυαλιού και κεραμικά χρωματισμού
Νεοδύμιο(Nd)	Ελαφριά	12-41.5	Μόνιμοι μαγνήτες, κράματα μπαταριών, κράματα μετάλλων, αυτόματοι καταλύτες, πρόσθετα γυαλιού, κεραμικά, φίλτρα υπέρυθρων, λέιζερ
Προμήθειο(Pm)	Ελαφριά	Μη διαθέσιμο	Ρολόγια, βηματοδότες ,έρευνα, μικροσκοπικές πυρηνικές μπαταρίες, φωσφόρους
Σαμάριο(Sm)	Ελαφριά	4.5-8	Μαγνήτες, κεραμικά, ακτινοθεραπεία (καρκίνος), φίλτρα μικροκυμάτων, πυρηνική βιομηχανία
Ευρώπιο(Eu)	Ελαφριά	0.14-2	Φώσφοροι
Γαδολίνιο(Gd)	Ελαφριά	4-8	Οπτικοποίηση εικόνων στην ιατρική, οπτική και μαγνητική ανίχνευση, κεραμικά, γυαλιά, κρυσταλλικοί σπινθηριστές
Τέρβιο(Tb)	Βαριά	0.65-2.5	Φώσφοροι, μαγνήτες ειδικά για υψηλές θερμοκρασίες, αμυντικά συστήματα στρατού.
Δυσπρόσιο(Dy)	Βαριά	3-7.5	Φώσφοροι, κεραμικά, πυρηνική βιομηχανία
Όλμιο(Ho)	Βαριά	0.7-1.7	Κεραμικά, λέιζερ, πυρηνική βιομηχανία, μόνιμοι μαγνήτες, εξοπλισμός μικροκυμάτων
Έρβιο(Er)	Βαριά	2.1-6.5	Κεραμικά, βαφές για γυαλί, οπτικές ίνες, λέιζερ, πυρηνική βιομηχανία

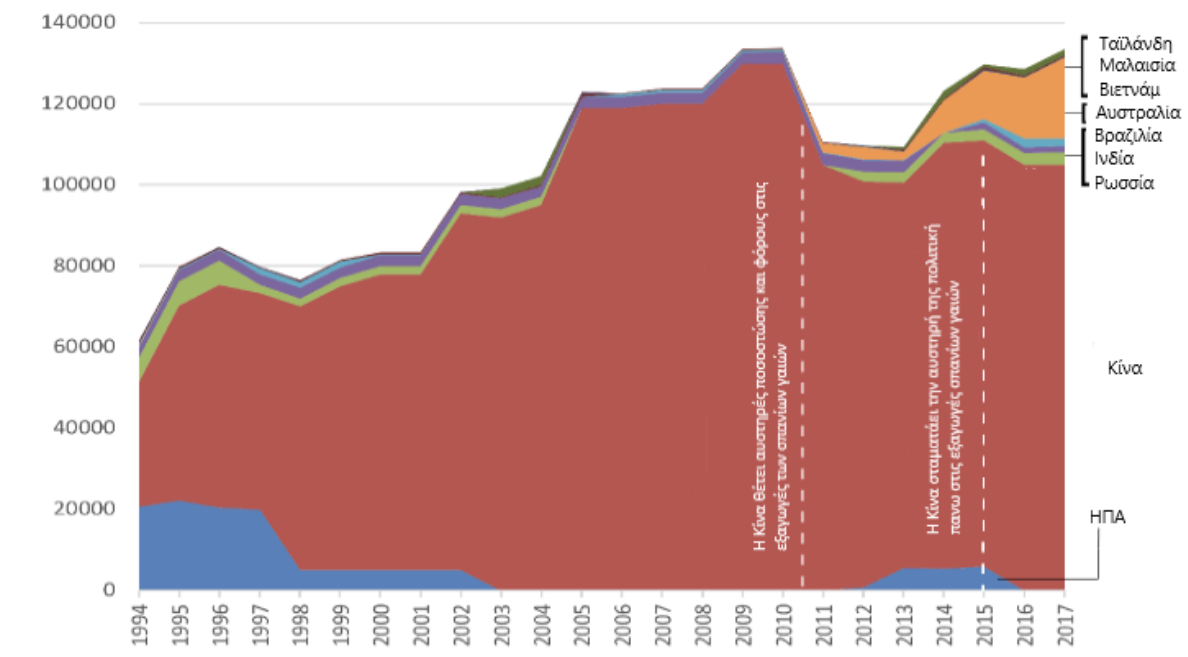
Θούλιο(Tm)	Βαριά	0.2-1	Λυχνία δέσμης ηλεκτρονίων, οπτικοποίηση εικόνων στην ιατρική
Υτέrbιο(Yb)	Βαριά	0.33-8	Μεταλλουργία (ανοξείδωτο ατσάλι), χημική βιομηχανία, ιατρική (θεραπεία καρκίνου)
Λουτέτσιο(Lu)	Βαριά	0.35-1.7	Μονοκρυσταλλικοί σπινθηριστές, δύλιση πετρελαίου
Σκάνδιο(Sc)	(Βαριά)	5-22	Κράματα υψηλής αντοχής Al-Sc, σωλήνες δέσμης ηλεκτρονίων
Ύτριο(Y)	—	24-70	Πυκνωτές, φωσφόροι, φίλτρα μικροκυμάτων, γυαλιά, αισθητήρες οξυγόνου, ραντάρ, λέιζερ, υπεραγωγοί

2.6 Οι Σπάνιες Γαίες σε Αριθμούς

Έχοντας όλες τις παραπάνω πληροφορίες είναι ενδιαφέρον να δούμε μερικούς από τους αριθμούς των σπάνιων γαιών για τις τελευταίες δεκαετίες στην παγκόσμια παραγωγή και στις τιμές τους των οξειδίων τους. Μ' αυτόν τον τρόπο θα είναι ευκολότερο ερμηνεύσουμε τις συνθήκες που έχουν οδηγήσει στην τρέχουσα κατάσταση και διέπουν τη βιομηχανία των σπάνιων γαιών.

2.6.1 Παγκόσμια Παραγωγή

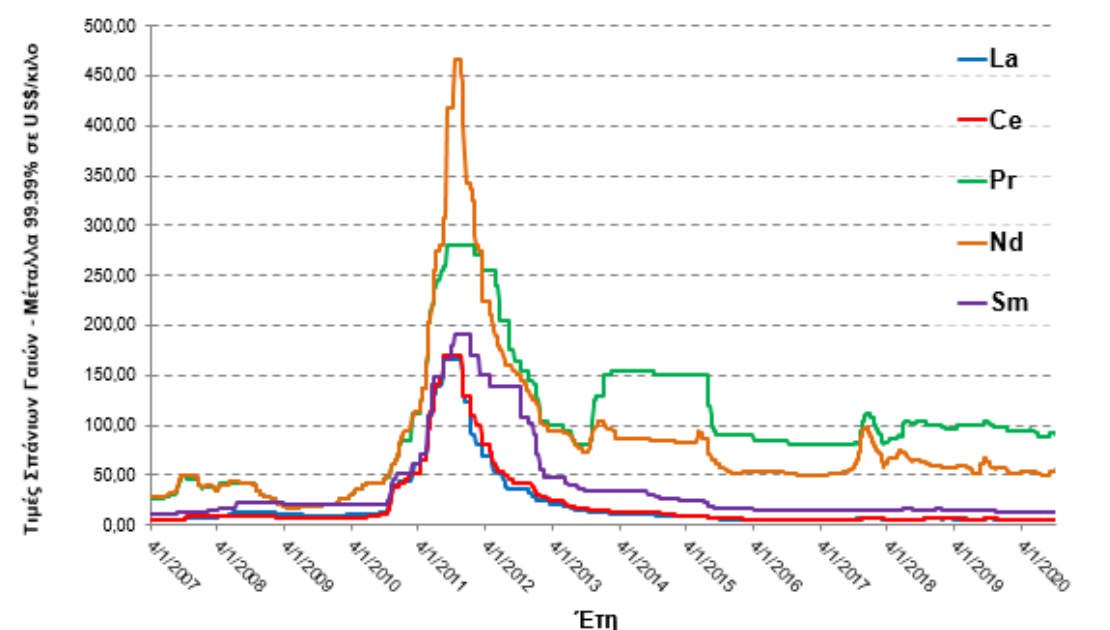
Η παγκόσμια παραγωγή έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες και η Κίνα έχει δείξει την κυριαρχία της από τα μέσα της δεκαετίας του 90 μέχρι και σήμερα (Εικόνα 4). Υπολογίζεται, ωστόσο, ότι η αποθήκευση σπάνιων γαιών στην Κίνα υπερβαίνει τους 450.000 τόνους, ενώ η πραγματική ζήτηση δεν αναμένεται να ξεπεράσει ακόμη και το ήμισυ αυτής της χωρητικότητας μέσα στα επόμενα χρόνια. Μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό ότι ακόμα κι αν η ετήσια παγκόσμια ζήτηση φτάσει τα επίπεδα προβλέψεων για το 2020 περίπου 200.000 τόνων, η Κίνα θα έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί σε αυτήν τη ζήτηση και να διατηρήσει τις τιμές σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, καθιστώντας πιθανά έργα σπάνιων γαιών εκτός Κίνας οικονομικά μη βιώσιμα(8,11).



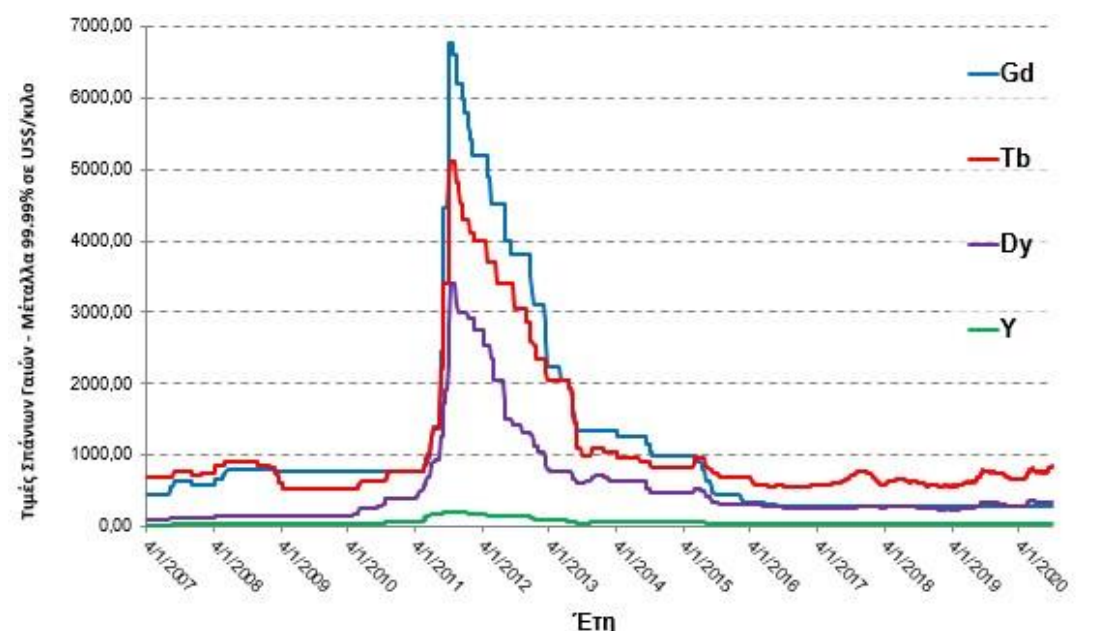
Εικόνα 4:Διάγραμμα παγκόσμιας παραγωγής Σπάνιων Γαιών (τόνοι) από το 1994-2017(30).

2.6.2 Παγκόσμιες Τιμές και Εμπορική Κίνηση

Οι σπάνιες γαίες εμπορεύονται κυρίως ως οξειδία σπάνιων γαιών (ΟΣΓ), μέταλλα ή κράματα. Η ζήτηση για σπάνιες γαίες αυξάνεται σταθερά κατά μέσο όρο περίπου 4% ετησίως από το 1975, ενώ από το 2012 έχει αυξηθεί κατά 5,9% ετησίως, εφόσον ανάκαμψε η ζήτηση που είχε κατασταλεί εξαιτίας της ανόδου των τιμών το 2011 (Εικόνα 5 και 6/www.metal-pages.com).

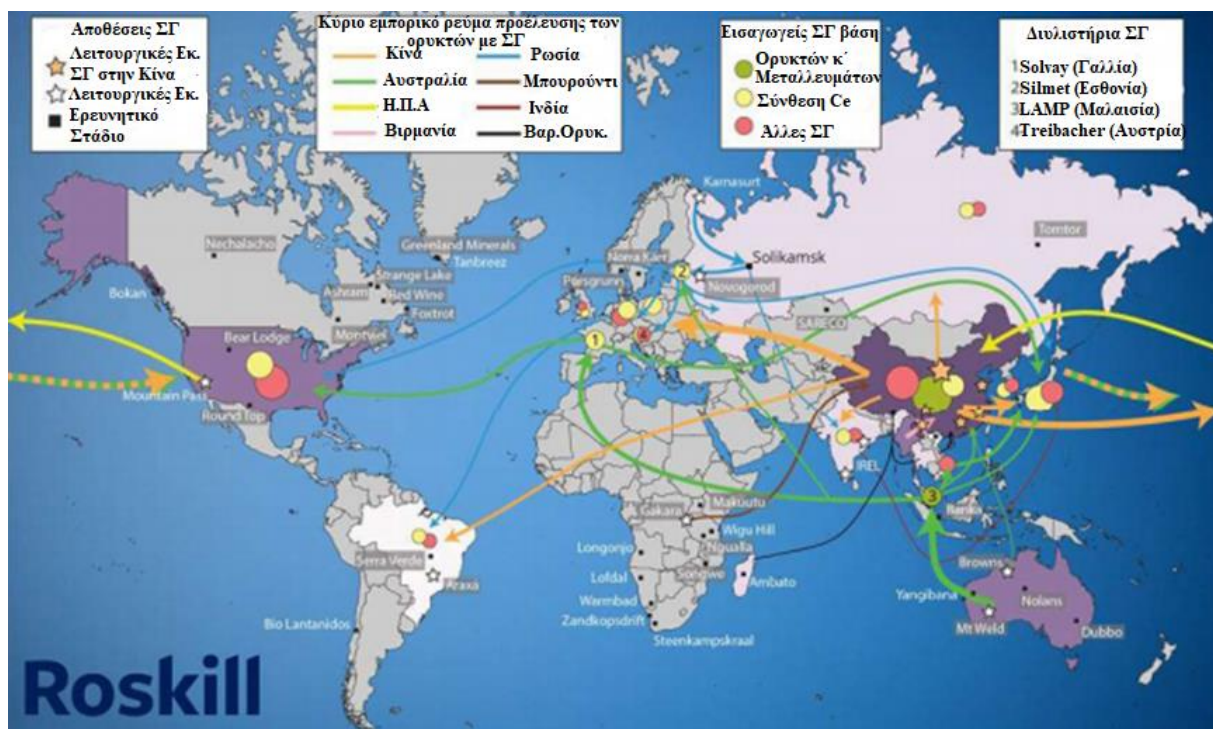


Εικόνα 5: Διάγραμμα τιμών μετάλλων των ΣΓ La,Ce,Pr,Nd,Sm σε USD/ kg από το 2007-2020



Εικόνα 6: Διάγραμμα των τιμών μετάλλων των ΣΓ Gd, Tb, Dy, Y σε USD/ kg από το 2007-2020

Σύμφωνα με τη Roskill (83), οι ΗΠΑ ήταν βασικός εξαγωγέας μετάλλων σπάνιων γαιών μεταξύ 2000 και 2013, που σχετίζεται κυρίως με επανεπεξεργασμένα μέταλλα που εισάγονται από την Κίνα. Από το 2014, οι εξαγωγές μειώθηκαν κάτω από τους 200 τόνους. Το Βιετνάμ έγινε ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός και εξαγωγέας, φθάνοντας τους 4.000 τόνους το 2018. Τα μέταλλα σπάνιων γαιών από το Βιετνάμ έχουν πολύ υψηλότερη τιμή κοντά στα 40 USD/kg, αντανακλώντας το Nd-Pr και άλλα βαρέα μέταλλα σπάνιων γαιών. Η Ταϊλάνδη εξάγει μέταλλα υψηλότερης αξίας (με μέσο όρο άνω των 50 USD/kg από το 2017), ενώ οι πηγές τροφοδοτούνται από τη Μαλαισία, την Ιαπωνία, την Κίνα και την Εσθονία. Οι εξαγωγές στις Φιλιππίνες είναι χαμηλές, πιθανότατα αντιπροσωπεύουν προϊόντα scrap που εξάγονται προς Ιαπωνία. Η Ιαπωνία εξάγει μικρούς όγκους μετάλλου, αλλά συνήθως πολύ υψηλότερης αξίας, με ετήσιες μέσες τιμές μονάδας μεταξύ 80-105 USD/kg από το 2016. Εξαγωγές από την Ολλανδία, την Ισπανία, την Αυστρία, τις ΗΠΑ και το Βέλγιο αντικατοπτρίζουν το επανεξαγόμενο εμπόριο. Από την άλλη η Νορβηγία, η Ινδία, οι ΗΠΑ, η Ταϊλάνδη, η Γερμανία και η Γαλλία είναι συνεπείς εισαγωγείς μετάλλων σπάνιων γαιών. Εισαγωγές από την Ιαπωνία και την Ταϊλάνδη είναι οι εισαγωγές με τις υψηλότερες τιμές σε 29 USD/kg και 36 USD/kg, αντίστοιχα, και αντανακλούν πιθανώς τις εισαγωγές από εγκαταστάσεις παραγωγής μαγνητών. Εισαγωγές μετάλλων σπάνιων γαιών στις ΗΠΑ και στην Γερμανία έχουν μέση τιμή μονάδας περίπου 10-12 USD/kg (Εικόνα 7) (REE 2020).



Εικόνα 7: Παγκόσμιος χάρτης κοιτασμάτων σπάνιων γαιών, ροή παραγωγής και εμπορίου, 2019. (Roskill 2019)

Μέχρι το 2025, οι μαγνήτες για σπάνιες γαίες προβλέπεται να ξεπεράσουν το ένα τρίτο της συνολικής ζήτησης, αλλάζοντας την εστίαση των παραγωγών και των μεταποιητών σπάνιων γαιών. Η μεταβαλλόμενη έμφαση στις σπάνιες γαίες με μαγνητικές πρώτες ύλες αναμένεται να επηρεάσουν τους μηχανισμούς τιμολόγησης των σπάνιων γαιών, που εξαρτώνται ολοένα και περισσότερο οικονομικά από ένα μικρό αριθμό ατόμων σπάνιων γαιών.

Η πολυπλοκότητα της αγοράς και οι δυσκολίες στον διαχωρισμό των επιμέρους ΣΓ είχαν ως αποτέλεσμα τη συνύπαρξη δύο αντίθετων επιχειρηματικών στρατηγικών από ορυχείο σε αγορά. Όλα τα πιθανά έργα εξόρυξης σπάνιων γαιών σκοπεύουν να επεξεργαστούν σπάνιες γαίες τουλάχιστον μέχρι ένα ορισμένο σημείο όπου παράγεται ένα ενδιάμεσο προϊόν (μεικτό οξείδιο σπάνιων γαιών/ανθρακικό/χλωρίδιο). Στη συνέχεια, το πρώτο επιχειρηματικό σχέδιο είναι η περαιτέρω επένδυση στην ίδρυση υδρομεταλλουργικής μονάδας για τον διαχωρισμό και τον καθαρισμό των επιμέρους στοιχείων σπάνιων γαιών και την πώλησή τους ως οξείδια σπάνιων γαιών στις αντίστοιχες τιμές τους. Εναλλακτικά, το δεύτερο επιχειρηματικό σχέδιο δεν είναι ο διαχωρισμός των οξειδίων των σπάνιων γαιών, αλλά η προώθηση της πώλησης του μικτού συμπυκνώματος ΣΓ σε τρίτες εταιρείες μεταποίησης, ωστόσο, σε μειωμένες τιμές. Κάθε στρατηγική έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και μέσω αξιολογήσεων υποδεικνύεται ποια στρατηγική είναι πιο ορθή από οικονομική άποψη σε σχέση με τις οριακές

συνθήκες που διέπουν κάθε έργο ΣΓ ξεχωριστά. Μερικές από τις προκλήσεις κατά τον σχεδιασμό της επεξεργασίας σπάνιων γαιών σε διαχωρισμένα οξείδια σπάνιων γαιών περιλαμβάνουν το υψηλότερο κόστος καθώς και τις μακροσκελείς, αυστηρότερες και προσαρμοσμένες στον πελάτη προδιαγραφές προϊόντων. Από την άλλη πλευρά, η επεξεργασία ΣΓ σε ένα ενδιάμεσο προϊόν μπορεί να μειώσει το σύνολο των αγοραστών εφόσον διαθέτουν μεθόδους διαχωρισμού ή έχοντας συνεργασίες με τρίτους. Επιπλέον, η τιμή πώλησης του μικτού προϊόντος πρέπει να μειωθεί για να αντισταθμιστεί η αδιαχώριστη φύση του(41) (Πίνακας 5).

Με βάση τόσο τις εφαρμογές των ΣΓ, της ορυκτολογίας, της γεωλογίας αλλά κυρίως της μεταλλουργικής οικονομίας, στο παρακάτω κεφάλαιο περιγράφεται η κατανομή των σπάνιων γαιών στον παγκόσμιο χάρτη με σημείο αναφοράς την Κίνα.

Πίνακας 5: Τιμές των οξειδίων και των μετάλλων των σπανίων γαιών στις 12/05/2021.(www.metal-pages.com)

Στοιχείο	Τιμή μονάδας*	Τιμή
Οξείδιο του Λανθανίου 99,5-99,9% fob** Κίνας	USD/kg	1,525
Οξείδιο του Λανθανίου 99,999% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	3,325
Μέταλλο του Λανθανίου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	6,350
Οξείδιο του Δημητρίου 99,5-99,9% fob Κίνας	USD/kg	1,545
Μέταλλο του Δημητρίου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	6,400
Οξείδιο του Πρασεοδυμίου 99,5-99,9% fob Κίνας	USD/kg	82,500
Μέταλλο του Πρασεοδυμίου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	108,500
Οξείδιο του Νεοδυμίου 99,5-99,9% fob Κίνας	USD/kg	80,500
Μέταλλο του Νεοδυμίου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	99,000
Οξείδιο του Σαμάριου 99,5% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	1,950
Μέταλλο του Σαμάριου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	14,750
Οξείδιο του Ευρώπιου 99,99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	30,500
Μέταλλο του Ευρώπιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	277,500
Οξείδιο του Γαδολίνιου 99,999% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	49,500
Μέταλλο Γαδολίνιου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	63,500
Οξείδιο του Τέρβιου 99,99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	1.107,500
Μέταλλο του Τέρβιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	1.422,500
Οξείδιο του Δυσπρόσιου 99,5% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	382,500
Μέταλλο του Δυσπρόσιου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	500,500
Οξείδιο του Όλμιου 99,5% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	104,750
Μέταλλο του Όλμιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Οξείδιο του Έρβιου 99,5% ελάχιστο cif*** Ευρώπης	USD/kg	32,000
Μέταλλο του Έρβιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Οξείδιο του Θούλιου 99,99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Μέταλλο του Θούλιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Οξείδιο του Υτέρβιου 99,99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	15,300
Μέταλλο του Υτέρβιου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Οξείδιο του Λουτετσίου 99,99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	822,500
Μέταλλο του Λουτετσίου 99% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	N/A
Οξείδιο του Υτρίου 99,999% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	5,250
Μέταλλο του Υτρίου 99,9% ελάχιστο fob Κίνας	USD/kg	38,500

Ελαφριές Σπάνιες Γαίες ,Βαριές Σπάνιες Γαίες. *Δολάρια ΗΠΑ ανά χιλιόγραμμα βάρους.**fob - Free on Board: ο αγοραστής είναι υπεύθυνος για τα έξοδα αποστολής και άλλα έξοδα, καθώς και την ασφάλιση αμέσως μόλις τα εμπορεύματα φορτωθούν στο πλοίο και κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. ***cif - Cost, Insurance and Freight:: ο πωλητής αναλαμβάνει την ευθύνη για το κόστος και τις υποχρεώσεις έως ότου η αποστολή φτάσει στον προορισμό.

3. Παγκόσμια Κατανομή των Σπάνιων Γαιών

3.1.1 Παγκόσμιοι Πόροι Σπάνιων Γαιών

Δεν θεωρούνται όλες οι σπάνιες γαίες πολύ σημαντικές, καθώς ορισμένες έχουν διαθέσιμα υποκατάστατα. Ωστόσο, έχουν μέχρι στιγμής αποδειχθεί απαραίτητες. Η αξιολόγηση σε μεγάλο βαθμό είναι σημαντική για διάφορες βιομηχανίες καθώς και για τις οικονομίες που βασίζονται σε αυτές, ειδικά τα τελευταία 10 χρόνια. Το βασικό σημείο εδώ είναι ότι οι σπάνιες γαίες δεν είναι λιγοστές, όμως η έλλειψή τους οδηγεί σε ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο επιπτώσεων σχετικά με τον ανταγωνισμό για την πρόσβαση, που δεν πρέπει να ισχύει για τις σπάνιες γαίες από γεωλογική και γεωγραφική άποψη. Παρ' όλα αυτά, οι σπάνιες γαίες βρίσκονται συχνά σε χαμηλές συγκεντρώσεις, επομένως η εξαγωγή τους από τα διάφορα μέταλλα στα οποία βρίσκονται και ο εξευγενισμός τους για βιομηχανική χρήση έχει αποδειχθεί εξαιρετικά δύσκολη και 'τοξική' υπόθεση. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη συγκέντρωση της παραγωγής(11).

Το 2017 ο αριθμός των εμφανίσεων που είχαν ενδιαφέρον ήταν πάνω από 850 παγκοσμίως (Εικόνα 8). Αν και η Κίνα διατηρεί ακόμα, παραπάνω από το ένα τρίτο των πόρων σπάνιων γαιών του κόσμου, οι παραδοσιακές και αναδυόμενες δυνάμεις είναι τώρα επίσης παρούσες στην αγορά. Αυτό το γεγονός και μόνο, ωστόσο, δεν επιλύει αυτόματα το πρόβλημα της προσφοράς ούτε την αδιαφάνεια και την πολυπλοκότητα της αγοράς των ΣΓ(30). Προφανώς, αυτές οι νέες, μη Κινεζικές πηγές θα μπορούσαν να αλλάξουν σε βάθος χρόνου τη δυναμική της αγοράς(36). Για αυτό όταν οι τιμές ΣΓ ήταν υψηλές, οι επενδύσεις φάνηκαν να είναι δελεαστικά εύκολες(11).



Εικόνα 8: Παγκόσμιος χάρτης με αποθέσεις ΣΓ. Πηγή: <https://mrdata.usgs.gov/ree/map-us.html#home>

3.1.2 Σημαντικότερα Έργα Εξόρυξης και Δυνητικά Έργα ΣΓ Παγκοσμίως

Από τα εκατοντάδες πιθανά έργα εξόρυξης ΣΓ, πολύ λίγα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο και ακόμα μικρότερος είναι ο αριθμός των ενεργών έργων εξόρυξης. Μερικά από αυτά τα έργα και προγράμματα που υπάρχουν σε όλη την γη θα αναφερθούν συνοπτικά σε αυτό το κεφάλαιο (11)(Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Παγκόσμιος Χάρτης που δείχνει την παγκόσμια κατανομή κοιτασμάτων και ορυχείων ΣΓ(11).

Τα έργα των σπάνιων γαιών βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια στον κόσμο, με την πλειοψηφία να είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένα στην Κίνα και να ακολουθούν η Ινδία, η Αυστραλία, οι ΗΠΑ και η Ρωσία. Μερικά έργα βρίσκονται σε κατασκευαστικό στάδιο όπως σε Νότια Αφρική και Καζακστάν, και σε στάδιο των μελετών σκοπιμότητας από άλλες χώρες, συμπεριλαμβανομένου και του Καναδά. (Πίνακας 6 και 7) (Roskill)

Πίνακας 6: Ενεργά ορυχεία σπανίων γαιών παγκοσμίως.

ΑΡ.	ΕΝΕΡΓΟ ΕΡΓΟ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΣΓ	ΧΩΡΑ	ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ
1	Mountain Pass	Η.Π.Α.	MP Mine Operations LLC
2	Lovozero	Ρωσία	OJSC Uralkali
3	Khibin	Ρωσία	JSC Acron
4	Bayan Obo	Κίνα	Baogang Group
5	Weishan Lake	Κίνα	Chinalco
6	Mianning	Κίνα	Chinalco
7	Longnan	Κίνα	Ganzhou Mining Group
8	Odisha	Ινδία	Indian Rare Earths
9	Chavara	Ινδία	Indian Rare Earths
10	Manavalakurichi	Ινδία	Indian Rare Earths
11	Mount Weld	Αυστραλία	Lynas Corporation

Πίνακας 7: Προχωρημένα ερευνητικά έργα σπανίων γαιών παγκοσμίως.

ΑΡ.	Διερευνητικό πρόγραμμα ΣΓ	Χώρα	Ιδιοκτησία
1	Bokan Dotson Ridge	Η.Π.Α	UCORE Rare Metals
2	Bear Lodge	Η.Π.Α	Rare Element Resources
3	Round Top Mountain	Η.Π.Α	Texas Mineral Resources
4	Nechalacho Thor Lake	Καναδάς	Avalon Rare Metals
5	Hoidas Lake	Καναδάς	Navis Resources Corp
6	Eco Ridge	Καναδάς	Pele Mountain Resources
7	Kipawa	Καναδάς	Matamec Explorations Inc
8	Ashram	Καναδάς	Commerce Resources
9	Strange Lake	Καναδάς	Quest Rare Minerals
10	Pitinga	Βραζιλία	Mineração Taboca
11	Serra Verde	Βραζιλία	SVPM
12	Araxa	Βραζιλία	CBMM
13	Kvanefjeld	Γροιλανδία	Minerals & Energy
14	Motzfeldt	Γροιλανδία	Regency Mines
15	Tanbreez	Γροιλανδία	Rimbal Pty Ltd
16	Norra Kärr	Σουηδία	Leading Edge Materials
17	Lofdal	Ναμίμπια	Namibia Rare Earths
18	Steenkampskraal	Νότια Αφρική	Thorium Foundation
19	Zandkopsdrift	Νότια Αφρική	Frontier Rare Earths
20	Aksu Dıamas	Τουρκία	AMR Mineral Metal
21	Mrima Hill	Κένυα	Pacific Wildcat Resources
22	Tantalus	Μαδαγασκάρη	Tantalus Rare Earths
23	Kutessay II	Κιργιστάν	Stans Enegy
24	Browns Range	Αυστραλία	Northern Minerals
25	Nolans Bore	Αυστραλία	Arafura Resources Ltd
26	Dubbo Zirconia	Αυστραλία	Alkane Resources

Η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός ΣΓ παγκοσμίως, όπως αναφέραμε, και πέτυχε αυτό το αποτέλεσμα βάσει ενός μακροπρόθεσμου στρατηγικού σχεδίου. Ωστόσο, το 2011 η κρίση στις τιμές δεν πυροδότησε μόνο το σαφάρι ανακάλυψης ΣΓ σε όλο τον πλανήτη, αλλά παράλληλα παρακίνησε πολλούς μικρούς παράνομους παραγωγούς να ξεκινήσουν παράνομες εκμεταλλεύσεις και να κάνουν λαθρεμπόριο σπανίων γαιών για πελάτες εκτός Κίνας. Η παράνομη δραστηριότητα επέτεινε την περιβαλλοντική μόλυνση, γιατί φυσικά οι παράνομοι παραγωγοί νοιάζονταν μόνο για το κέρδος και όχι την αποκατάσταση. Και φυσικά ήταν (και είναι ακόμα) πολύ δύσκολο για την κυβέρνηση να τους ελέγξει μέσα στην χαώδη επαρχία της Κίνας. Για αυτό αποφάσισαν να ομαδοποιήσουν όλους τους μικρούς νόμιμους παραγωγούς για να τους ελέγχουν και να προσπαθήσουν να ανακαλύψουν τους παράνομους (είτε ανάμεσα στους μικρούς νόμιμους είτε άλλου) και να τους περιορίσουν(20). Σήμερα η βιομηχανία ΣΓ στην Κίνα είναι πολύ καλύτερα οργανωμένη από το 2015 διότι ο αριθμός των ανεξάρτητων εταιριών εξόρυξης και επεξεργασίας ΣΓ έχει μειωθεί δραστικά σε μια βιομηχανία που σήμερα ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από έξι κρατικές εταιρείες. Σύμφωνα με πηγές του Υπουργείου Βιομηχανίας και Πληροφορικής της Κίνας (MIIT), υπήρχαν 99 εταιρείες τήξης και διαχωρισμού ΣΓ και 67 νόμιμες εκμεταλλεύσεις ΣΓ στην Κίνα τον Φεβρουάριο του 2015. Από αυτές, οι 66 νόμιμες εκμεταλλεύσεις και οι 77 εταιρίες διαχωρισμού ανήκουν πλέον στους έξι μεγάλους ομίλους επιχειρήσεων(roskill 15).

- Όμιλος Baogang, συμπεριλαμβανομένου του κορυφαίου παραγωγού σπανίων γαιών της Κίνας, Inner Mongolia Baotou Steel Hefa Rare Earth Co Ltd και άλλων μικρότερων εταιριών σπανίων γαιών στην Εσωτερική Μογγολία (Inner Mongolia, επαρχία της βόρειας Κίνας σύνορα με Μογγολία) και το Κανσού.
- Chinalco, από ενσωμάτωση επιχειρήσεων ΣΓ στις επαρχίες Κουανγκσί, Τσιανγκσού, Σιτσουάν και Σαντόνγκ.
- Xiamen Tungsten Group, από ενσωμάτωση εταιριών διαχωρισμού στην επαρχία Φουτσιάν.
- Minmetals, συγχωνευόμενες εταιρείες διαχωρισμού και εμπορίας στις επαρχίες Χουνάν καθώς και στο Φουτσιάν, Γκουανγκντόνγκ, Γιουνάν και Τζιανγκσί.
- Guangdong RE Group, από ενσωμάτωση εταιριών στο Γκουανγκντόνγκ.
- Ganzhou Mining Group, που ενσωματώνει εταιρείες εξόρυξης και διαχωρισμού στην επαρχία Τζιανγκσί.

Τις μεγαλύτερες αποθέσεις εκμεταλλεύονται τρεις από τις προαναφερθείσες ομάδες (Baogang group, Chinalco και Ganzhou Mining group) που βρίσκονται σε τέσσερις περιοχές στην Κίνα, Μπαοτού, Σαντόνγκ, Σιτσουάν και Τζιανγκσί, που μαζί φιλοξενούν το 88% των κινεζικών πόρων σε ΣΓ. Τα ορυχεία με ΕΣΓ βρίσκονται κυρίως στην περιοχή Μπαοτού στην εσωτερική Μογγολία, στην επαρχία Σαντόνγκ κοντά στη λίμνη Γουέισαν, καθώς και στην επαρχία Μιάνινγκ Σιτσουάν. Η απορρόφηση ιόντων ΒΣΓ βρίσκεται στη νότια Κίνα κατά κύριο λόγο στο Τζιανγκσί, αλλά και στις επαρχίες Γκουανγκντόνγκ, Φουτσιάν και Κουανγκσί(42)(roskill 15).

Το μεγαλύτερο έργο εξόρυξης σπανίων γαιών στον κόσμο βρίσκεται στην Κίνα και συγκεκριμένα στο Bayan Obo με αποθεματικό 35 εκ.τ ΟΣΓ, που αντιπροσωπεύει το 83% των ελαφρών σπανίων γαιών της Κίνας. Η γιγαντιαία πολυμεταλλική απόθεση στο Bayan Obo Fe-Nb(ΣΓ) ελέγχεται από την Inner Mongolia Baotou Steel Hefa Rare Earth Co Ltd που ανήκει τώρα στον Όμιλο Baogang. Ο σίδηρος είναι το κύριο προϊόν στο Bayan Obo, ενώ οι ΣΓ και το νιόβιο εκμεταλλεύονται ως υποπροϊόντα. Ο μέσος βαθμός ΟΣΓ είναι περίπου 6%. Τα ορυκτά με σπάνιες γαίες στο Bayan Obo είναι μπαστναζίτης και μοναζίτης, δηλαδή ορυκτά που κυριαρχούν οι ΕΣΓ(11).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες μόνο ένα ορυχείο λειτούργησε πρόσφατα στο Mountain Pass στη Καλιφόρνια, αλλά υπάρχουν επίσης πολλά ενδιαφέροντα διερευνητικά έργα. Παρά το γεγονός ότι οι πόροι περίπου 13 εκ.τ. ΣΟΣΓ αναφέρθηκαν τα προηγούμενα χρόνια, πραγματοποιήθηκε αναθεώρηση το 2015 ώστε να συμπεριληφθούν μόνο εκείνα που συμμορφώνονται με αναγνωρισμένα πρότυπα, με αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση. Οι τρέχοντες πόροι των ΗΠΑ περιλαμβάνουν περίπου 1,5 εκ.τ στο Mountain Pass και 390.000 τόνους στην απόθεση Bear Lodge στο Ουαϊόμινγκ. Οι δραστηριότητες στο Mountain Pass ξεκίνησαν το 1965 και ήταν ο κορυφαίος παραγωγός παγκοσμίως για δεκαετίες, υπό τη διαχείριση πολλών εταιρειών. Οι εξορυκτικές δραστηριότητες σταμάτησαν το 1998 και ξεκίνησαν ξανά το 2012. Οι αναφερόμενοι ορυκτοί πόροι της κατάθεσης υπολογίζονται σε 34,7 εκ.τ. με μέσο βαθμό 8,9% του ΣΟΣΓ. Η απόθεση έχει το ορυκτό μπαστναζίτη από ΣΓ το οποίο αποτελείται από ΕΣΓ. Το 2012, η Molycorp δεσμεύτηκε να επεκτείνει το ορυχείο στη Καλιφόρνια, το οποίο κόστισε 1,6 δισεκατομμύρια δολάρια και αγόρασε τη Neo Material Technologies που είναι μια κορυφαία εταιρεία μεταποίησης σπανίων γαιών. Επίσης, διατέθηκαν 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια για την αναβάθμιση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας και διαχωρισμού. Πιεζόμενη από τη μείωση των τιμών των προϊόντων της, ωστόσο, η Molycorp αναγκάστηκε να αυξήσει το

μετοχικό της κεφάλαιο, γεγονός που οδήγησε αρκετούς επενδυτές σε μια επικίνδυνη εμπορική περιπέτεια, με αποτέλεσμα παρά τις ανακεφαλαιοποιήσεις, η Molycorp να μην μπορεί να αποφύγει την πτώχευση το 2015 με χρέος 1,7 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Εξαιτίας της πτώχευσης, η Molycorp αποφάσισε στις αρχές του 2016 να εγκαταλείψει την εγκατάσταση εξόρυξης στο Mountain Pass. Η εταιρεία προσπάθησε να ανοικοδομηθεί γύρω από την σειρά των επιχειρήσεων Neo Material που επεξεργάζονται σπάνιες γαίες, ενώ το ορυχείο του Mountain Pass πραγματοποιούσε ρευστοποίηση κεφαλαίων. Αυτή η ενέργεια προκάλεσε διαφωνίες μεταξύ των δανειστών της και ανησυχίες μεταξύ των ρυθμιστικών αρχών σχετικά με τη βασική ασφάλεια και λειτουργία της εγκατάστασης προκειμένου να αποφευχθεί η μόλυνση της διαρροής λυμάτων από το περιβάλλον. Τέλος, η Molycorp και οι ασφαλιστές της ανακοίνωσαν συμφωνία για την παράδοση του ορυχείου του Mountain Pass σε έναν διαχειριστή για σύντομο χρονικό διάστημα, αποφεύγοντας τα προβλήματα με την προμήθεια νερού ή άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα. Τελικά, το ορυχείο του Mountain Pass αγοράστηκε χωριστά από την MP Mine Operations LLC τον Ιούλιο του 2017(11,43).

Ένα από τα προχωρημένα έργα για σπάνιες γαίες βρίσκεται στις Η.Π.Α., το Bear Lodge. Το κοιτάσμα Bear Lodge στο Wyoming διερευνάται από την Rare Earth Resources. Εκεί, ενώ βρίσκονται πετρώματα καρβονίτη, όπως και στο Mountain Pass, τα ορυκτά που διαθέτουν είναι κυρίως αγκυλίτης μαζί με μπαστναζίτη και μοναζίτη. Λόγω δεδομένης σημαντικής προόδου στις συνομιλίες της εταιρίας και με τη Synchron ως σημαντικό μέτοχο το 2020 και στις αρχές του 2021, η εταιρεία και το έργο Bear Lodge θα φτάσει σε ένα καλό σημείο να πέτυχει την δημιουργία μιας βραχυπρόθεσμης ασφαλούς εγχώριας προμήθειας πολύ σημαντικών σπάνιων γαιών σε μια εποχή που η αμερικανική αγορά απαιτεί νέες αξιόπιστες πηγές(44).

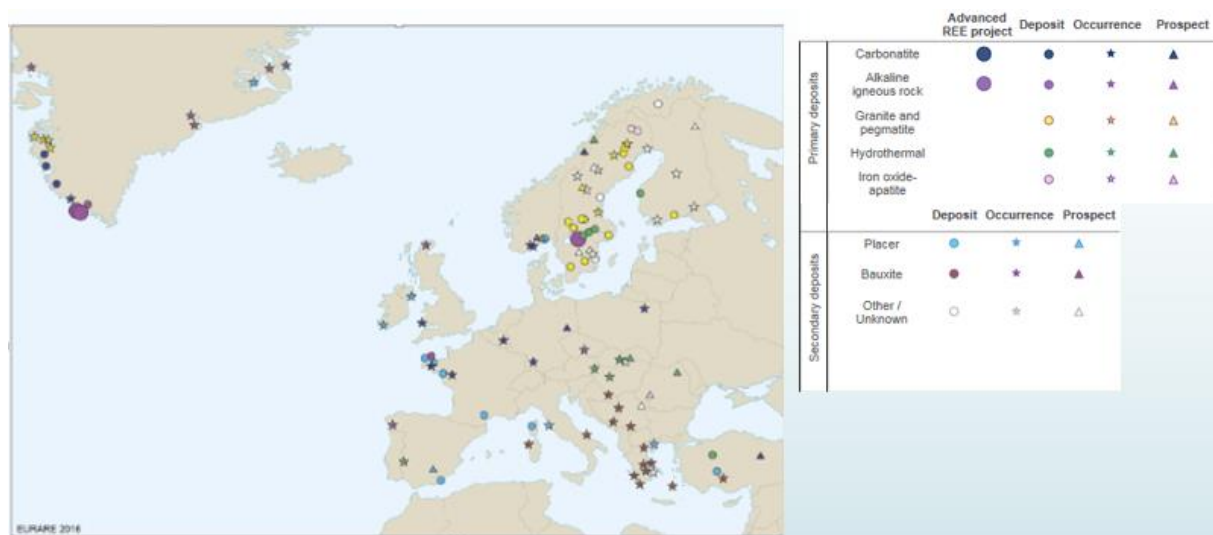
Το Mount Weld στη Δυτική Αυστραλία είναι από τους μεγαλύτερους παραγωγούς, ανήκει στην Lynas Corporation Ltd. Μέχρι το 1996, η Αυστραλία ήταν ο μεγαλύτερος παραγωγός σε συγκεντρώσεις μοναζίτη στον κόσμο αλλά η παραγωγή σταμάτησε λόγω των προβλημάτων που σχετίζονται με τη μονάδα διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων θορίου. Η εξόρυξη σπάνιων γαιών στο όρος Weld ξεκίνησε το 2007 και οι πρώτες δραστηριότητες εξόρυξης ολοκληρώθηκαν το 2008, έχοντας εξορύξει και αποθέσει 773.300 τόνους μεταλλεύματος. Η Lynas επέκτεινε το πρόγραμμα γεώτρησης στο Mount Weld και άρχισε να λειτουργεί σε αυτό εγκατάσταση συγκέντρωσης. Το ορυχείο άνοιξε επίσημα τον Αύγουστο του 2011. Η απόθεση αποτελείται από δύο μεταλλευτικά αποθέματα, γνωστά ως το κεντρικό απόθεμα λανθανίδης

(CLD) και το απόθεμα Duncan. Συνολικοί ορυκτοί πόροι είναι στα 23,9 εκ.τ. και με μέσο βαθμό στα 7,9% των ΕΣΓ που έχουν υπολογιστεί για αυτά τα δύο μεταλλευτικά αποθέματα. ΕΣΓ υπάρχουν στην απόθεση της CLD και βρίσκονται κυρίως σε υπεργένειες περιοχές μοναζίτη, ενώ στην απόθεση Duncan, οι συγκεντρώσεις με μεγαλύτερη αναλογία ανήκουν σε ΒΣΓ που βρίσκονται σε churchite, μοναζίτη και ξενότιμο(11).

Ένα από τα μεγαλύτερα προχωρημένα έργα βρίσκεται στην Βραζιλία, στην πολιτεία Minas Gerais και το διαχειρίζεται η Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), το Araxa. Το κοίτασμα Araxa θεωρείται το μεγαλύτερο κοίτασμα πυροχλωρίου στον κόσμο και βρίσκεται δίπλα στο ορυχείο φωσφορικών αλάτων της Vale καθώς και στη μεγαλύτερη λειτουργία ορυχείου νιοβίου στον κόσμο το οποίο ανήκει και λειτουργεί από την CBMM. Λόγω της λήξης του έργου κοντά σε αυτά τα δύο ορυχεία λειτουργίας, το έργο Araxa θα επωφεληθεί από την υπάρχουσα τοπική υποδομή. Η απόθεση αποτελείται κυρίως από το ΕΣΓ και τα εκτιμώμενα αποθέματά της είναι περίπου 106,4 εκ.τ. με μέσο βαθμό 7% σε ΣΟΣΓ. Το κύριο ορυκτό με σπάνιες γαίες είναι ο μοναζίτης(45)(roskill 15).

3.2.1 Προχωρημένα Έργα Και Δυνητικά Έργα Εξόρυξης στην Ευρώπη

Η Ευρώπη διατηρεί τεχνογνωσία μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο όσον αφορά την μεταλλουργική επεξεργασία των ΣΓ, ενώ η εξορυκτική βιομηχανία φθίνει, παρόλες τις ενδιαφέρουσες γεωλογικές έρευνες. Οι παλαιότερες είναι γνωστές στις σκανδιναβικές χώρες και τη Γροιλανδία, όπου έχουν γίνει μέχρι στιγμής οι πιο σημαντικές ανακαλύψεις σπανίων γαιών. Μόνο τα τελευταία χρόνια συναντάμε αναλυτικές γεωλογικές μελέτες, με βάσεις δεδομένων από τις Ευρωπαϊκές Γεωλογικές Έρευνες και άλλα ιδρύματα, που περιλαμβάνουν σχετικές γεωχημικές πληροφορίες σχετικά με τις σπάνιες γαίες. Τα περισσότερα από αυτά τα ιδρύματα διαθέτουν άφθονες πληροφορίες σχετικά με την εξερεύνηση πολλών ορυκτών και μετάλλων, αλλά επειδή οι σπάνιες γαίες είχαν περιορισμένο εμπορικό ενδιαφέρον τον 20ό αιώνα, δεν είχαν λάβει επαρκή χρηματοδότηση ή προσοχή για εξερεύνηση. Ενώ υπάρχουν πολλές δυνητικά οικονομικές και άλλες αποθέσεις όπως στο 'Norra Kärr, το Olserum στην Σουηδία, το Kvanefjeld και το Kringlerne στη Γροιλανδία, το Fen στη Νορβηγία, το Kontioaho, το Korsnas και το Konvela στη Φινλανδία και πολλά άλλα στην κεντρική και νότια Ευρώπη, δεν υπάρχει σε λειτουργία εξόρυξη σπανίων γαιών στην ΕΕ (46)(Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Χάρτης που δείχνει την Ευρωπαϊκή κατανομή διερευνητικών έργων, κοιτασμάτων, εμφανίσεων και περιοχών με προοπτική εμφανίσεων ΣΓ(46).

3.2.2 Γροιλανδία

Ορισμένες εμφανίσεις σπάνιων γαιών στη Γροιλανδία έχουν εντοπιστεί και βρίσκονται υπό εξερεύνηση. Ειδικότερα, το αλκαλικό σύμπλεγμα Pimaussaq στη νότια Γροιλανδία φιλοξενεί έναν αξιόλογο αριθμό. Οι Kvanefjeld, Tanbrevz (Kringlerne) και Motzfeldt παρουσιάζονται παρακάτω ως οι πιο σημαντικές μαζί με το Sarfartoq που εντοπίζεται στην δυτική Γροιλανδία. Η Γροιλανδία ακολουθεί φιλική πολιτική σχετικά με τις εξορύξεις. Εν τούτοις οι κυβερνώντες, παρά το ευνοϊκό περιβάλλον που υπήρχε, δεν προχώρησαν σε εξόρυξη σπανίων γαιών για μια δεκαετία γιατί αυτές συνυπήρχαν σε μεταλλεύματα ουράνιου, του οποίου η εξόρυξη απαγορεύονταν. Το 2013 η κυβερνητική πολιτική άλλαξε υπέρ της εξόρυξης των σπανίων γαιών για να προχωρήσουν τα έργα(47).

Το έργο Kvanefjeld ανήκει στην Greenland Minerals & Energy και απαρτίζεται κυρίως από ΕΣΓ που υπάρχουν στα ορυκτά όπως ο σφαλερίτης, λοβοζερίτης, ευδιαλύτης, βιτουσίτης και το Steenstrupine που είναι ένα σύμπλοκο πυριτικών ορυκτών, φωσφορικών ορυκτών και αλάτων φθορίου. Βρίσκεται στη βορειοδυτική γωνία του συγκροτήματος Pimaussaq και περιέχει μια τεράστια πηγή πολλαπλών στοιχείων που φτάνει στους 1010 εκ.τ. και βαθμολόγηση 1,08% κ.μ. των ΣΟΣΓ. Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη σκοπιμότητας του έργου στα μέσα του 2015, το ορυχείο εκτιμάται να έχει αρχική διάρκεια παραγωγής άνω των 30 ετών. Μετά την άρση της απαγόρευσης της εξόρυξης ουράνιου, η κυβέρνηση σκοπεύει να οριστικοποιήσει τους κανονισμούς και να δώσει προτεραιότητα στην ανάπτυξη του έργου στο

Kvanefjeld, εάν και η νέα κυβέρνηση άλλαξε εκ νέου της στρατηγικής της. Αυτή η κομβική κίνηση θα είναι ένα κρίσιμο βήμα για το άνοιγμα ενός από τους μεγαλύτερους πόρους στον κόσμο. Τόσο τα μέταλλα σπάνιων γαιών όσο και το ουράνιο θα μπορούσε να αλλάξει τη δυναμική της παγκόσμιας προσφοράς σε ΣΓ(48).

Το κοιτάσμα σπάνιων γαιών στο Motzfeldt , αποτελείται από πολλαπλές διεισδύσεις συνενίτη και περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις τανταλίου, νιοβίου, θορίου, ουρανίου και ζirkονίου, καθώς και υψηλής ποιότητας διασταυρώσεις ΣΓ που σχετίζονται με υπόγεια πετρώματα πηγματίτη. Το έργο, το οποίο διευθύνει η Regency Mines, βρίσκεται ακόμη στο αρχικό στάδιο εξερεύνησης. Παρόλα αυτά, οι πρώτες αναφορές υπολογίζουν τα αποθέματα σε 1250 εκ.τ. και βαθμολόγηση 0,6-1,5% κ.μ. του ΣΟΣΓ(11).

Στο Tanbreez της Γροιλανδίας εκτελείται το έργο του Kringlerne που ανήκει στην Tanbreez Mining Greenland A/S θυγατρική εταιρία της Αυστραλιανής εταιρίας Rimbal Pty Ltd που εγκατέστησε το έργο. Μαζί με την πιθανή εκμετάλλευση βαρέων στοιχείων σπάνιων γαιών, το έργο βασίζεται και σε άλλα κύρια στοιχεία όπως το ταντάλιο, το νιόβιο και το ζirkόνιο. Όλα τα προϊόντα περιέχονται στον ορυκτό ευδιαλύτη. Με 4,7 δισεκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος, το τεράστιο κοιτάσμα μπορεί να είναι μια σημαντική πηγή ΣΓ λαμβάνοντας υπόψη ότι το ποσοστό ΒΣΓ είναι 30% ακόμα κι αν η βαθμολόγηση είναι στο 0,65% κ.μ. ΣΟΣΓ που είναι χαμηλό(49).

Το ανθρακικό σύμπλεγμα του Sarfartoq εμφανίζεται στη ζώνη μετάβασης μεταξύ των αρχαϊκών και παλαιοπροτεροζωικών γενέσεων στη νοτιοδυτική Γροιλανδία και ανήκει στην Hudson Resources. Το ανθρακικό σύμπλεγμα φιλοξενεί κοιτάσματα μεταλλεύματος και εμφανίσεις σπάνιων γαιών και νιοβίου από ορυκτά βαστνασίτη, μοναζίτη και Synchysite, τα οποία είναι μια ομάδα ανθρακικών ορυκτών. Τα αποθέματα του υπολογίζονται στους 8,34 εκ.τ με βαθμολόγηση 1,72% κ.μ. ΣΟΣΓ(50).

3.2.3 Νορβηγία

Το συγκρότημα Fen στη νοτιοανατολική Νορβηγία είναι ένα από τα κλασικά ανθρακικά συμπλέγματα στον κόσμο. Ήταν εδώ που αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά η πυριγενής φύση του ανθρακίτη και αποτέλεσε σημαντική πρόοδο στην κατανόηση της πετρολογίας των ανθρακικών και των περιεχομένων ΣΓ τους, που βασίστηκε σε μελέτες στο σύμπλεγμα Fen. Το σύμπλεγμα Fen έχει εκτεθειμένη επιφάνεια 6 km^2 και αποτελείται από μια σύνθετη διείσδυση καρβονατίτη, ιτζολίτη και πυροξενίτη. Οι ανθρακίτες, πυριγενή πετρώματα με >50% ανθρακικά ορυκτά, παρουσιάζουν οικονομικό δυναμικό καθώς έχουν την υψηλότερη μέση συγκέντρωση ΣΓ από όλα τα μαγματικά πετρώματα και σημαντικές ποσότητες Nb και P. Σχετικά υψηλής ποιότητας στοιχείων σπάνιων γαιών έως 1,6% κ.μ. ΣΟΣΓ βρίσκονται σε έναν υδροθερμικά τροποποιημένο, πλούσιο σε αιματίτη και ανθρακίτη γνωστό ως rødbergite(51).

3.2.4 Σουηδία

Ένα από τα πιο προχωρημένα έργα εξερεύνησης ΣΓ που βρίσκονται στην Ευρώπη είναι το Norra Kärr που βρίσκεται στην νότια Σουηδία μεταξύ Στοκχόλμης και Μάλμε κοντά στην πόλη Γκρένα (Gränna), και είναι το μεγαλύτερο έργο με ΒΣΓ στην Ευρώπη(52). Η εταιρία που διαχειριζόταν το έργο ήταν η Tasman Metals Ltd μέχρι τον Αύγουστο του 2016 οπότε και άλλαξε το όνομά της σε Leading Edge Materials ύστερα από την δημιουργία κοινοπραξίας. Το Norra Kärr είναι ένα υπεραλκαλικό διεισδυτικό συγκρότημα από νεφελίνη και συηνίτη που καλύπτει μια έκταση περίπου 450 μ. x 1500 μ. σε μέγεθος, που βρίσκεται κάτω από το έδαφος με το μεγαλύτερο βάθος γεώτρησης στα 350 μ. Τα πιθανά αποθέματα ορυκτών υπολογίζονται σε 23,5 εκ.τ. και κ.μ. 0,59% σε ΣΣΓ. Με βάση τις αξιολογήσεις που έγιναν, το ορυχείο είχε σχεδιαστεί να έχει 20 χρόνια διάρκεια ζωής (48). Η άδεια του Norra Kärr όμως ανακλήθηκε λόγω κοινωνικών ενστάσεων/αντιρρήσεων λόγω δυνητικών περιβαλλοντολογικών προβλημάτων, επειδή βρίσκεται κοντά σε περιοχή natura που προστατεύεται από την ΕΕ και στην λίμνη Vattern, εξαιτίας της μεθόδου εκμετάλλευσης που ήθελαν να ακολουθήσουν(53). Βέβαια μετά από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν φάνηκε ότι ακόμα και αν έπαιρνε την απαραίτητη κοινωνική συναίνεση για την λειτουργία του μεταλλείου (social license to operate)(54) θα ήταν μάλλον οικονομικά ζημιολόγο. Ως εκ τούτου θα μπορούσαμε να καταλήξουμε ότι οι κοινωνικοί λόγοι απέτρεψαν την πτώχευση της εταιρίας που με την σειρά

της μπορεί να δημιουργούσε περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της έλλειψης κονδυλίων για την συμμόρφωση με την ασφάλεια του περιβάλλοντος .

Βέβαια εκτός του Norra Kärr, στο νότιο άκρο του ορογόνου Svecofennian υπάρχουν ιζηματογενή πετρώματα του σχηματισμού Västervik που περιέχουν στρώματα βαρέων ορυκτών στην περιοχή Olserum. Η εναπόθεση μετάλλων σπανίων γαιών στην περιοχή Olserum-Djupedal θεωρήθηκε μια πιθανή προοπτική εξόρυξης σπανίων γαιών μετά την γεωλογική εξερεύνηση της περιοχής για σπάνιες γαίες στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η Tasman Metals Ltd. (τόρα Leading Edge Materials) διεξήγαγε περαιτέρω εξερεύνηση, συμπεριλαμβανομένης πρόσθετης χαρτογράφησης πεδίου και γεώτρησης πυρήνα, στοχεύοντας συγκεκριμένα στις σπάνιες γαίες. Τα ορυκτά που βρίσκονται στην περιοχή είναι κυρίως ξενότιμο (xenotime-Y), μοναζίτης (monazite-Ce), φθοριοσπατίτης (fluorapatite), και δευτερευόντως Y,ΣΓ,U,Fe και οξείδια με Nb,Ta, όπως και σε μικρότερες ποσότητες σχηματισμοί αλανίτη (allanite). Είναι σχετικά μικρός σχηματισμός 7,80 εκ.τ., χαμηλής ποιότητας σε πόρους 0,62 κ.μ. % ΣΟΣΓ με υψηλή σχετικά αφθονία σε ΒΣΓ (55). Επιπλέον, συνήχθη το συμπέρασμα ότι οι τοπικές διαφορές που επηρεάζουν τη χημεία, ειδικά η περιεκτικότητα σε Ca, μεταξύ των περιοχών Olserum και Djupedal, ήταν σημαντικοί παράγοντες για τον έλεγχο της σταθερότητας των πρωτογενών ορυκτών μεταλλευμάτων που φέρουν σπάνιες γαίες(48).

Στη βόρεια Σουηδία ξεχωρίζουν τα σημαντικά κοιτάσματα ΣΓ στην Kiruna που έχουν εντοπιστεί από την LKAB. Μετά την επιτυχή εξερεύνηση, η εταιρεία αναφέρει σήμερα ορυκτούς πόρους σπανίων γαιών που υπερβαίνουν τον ένα εκατομμύριο τόνους οξειδίων σπανίων γαιών, ένα από τα μεγαλύτερα κοιτάσματα στην Ευρώπη. Βέβαια ακόμα απαιτείται άδεια για παραχώρηση εκμετάλλευσης του κοιτάσματος Per Geijer για να διερευνηθούν οι συνθήκες εξόρυξης. Ελπιδοφόρα αποτελέσματα από τη συνεχιζόμενη εξερεύνηση της LKAB στην Kiruna και στο Gällivare παρουσιάστηκαν την άνοιξη 2022, παρόλο που το κοιτάσμα ήταν γνωστό από το 1990. Οι ΣΓ με βαθμό μεταλλοφορίας 0,85% στο Per Geijer εμφανίζονται μαζί με τον φώσφορο στον ορυκτό απατίτη, κοίτασμα σιδηρομεταλλεύματος και σε μαγνητίτη και θα είναι τα υποπροϊόντα τους. Η LKAB ήδη ξεκίνησε να σχεδιάζει ένα κυκλικό βιομηχανικό πάρκο στο Luleå ενώ εκτιμάται ότι θα χρειαστούν τουλάχιστον 10-15 χρόνια για να ξεκινήσει η εκμετάλλευση (48,56–58) .

3.2.5 Γερμανία

Στην πόλη Delitzsch της Γερμανίας βρίσκεται θαμμένο ανθρακικό σύμπλεγμα που έχει μικρή προοπτική για εκμετάλλευση σπανίων γαιών. Το έργο Storkwitz βορειοανατολικά της πόλης, το οποίο βρίσκεται σε μια ζώνη κρητιδικού ρήγματος είναι υπό εξερεύνηση από την Seltenerden Storkwitz AG. Οι συνολικοί πόροι είναι στα 4,4 εκ.τ. και σχετικά χαμηλής ποιότητας στα 0,45 κ.μ. % ΣΟΣΓ. Η απόθεση εμφανίζεται στα 300 μέτρα και εκτείνεται κατακόρυφα έως 700 μέτρα περίπου κάτω από την επιφάνεια κάτι που την κάνει δύσκολη για εκμετάλλευση(55).

3.2.6 Ισπανία

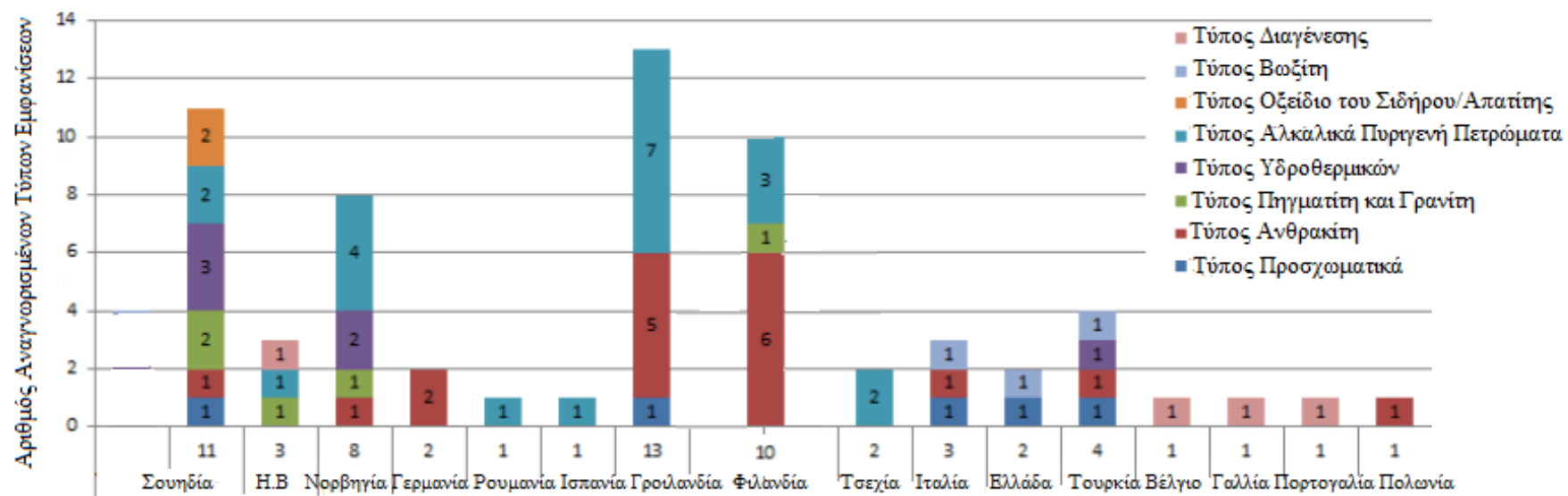
Άμμος από μοναζίτη στο Matamulas (Ciudad Real) στην Ισπανία είναι επίσης μια πιθανή πηγή σπανίων γαιών. Η εταιρεία Quantum Minería (QM) παρείχε την πρώτη αξιολόγηση του κοιτάσματος μεταλλευμάτων μοναζιτικής άμμου. Το κοιτάσμα Matamulas θα μπορούσε να περιέχει και 20,000 τόνους οξειδίων σπάνιων γαιών (52).

3.2.7 Τουρκία

Ενώ στο ευρωπαϊκό κομμάτι της Τουρκίας δεν συναντάμε εμφανίσεις ΣΓ, το έργο Aksu Diamas που βρίσκεται στην νοτιοδυτική Τουρκία και το διαχειρίζεται η AMR Mineral Metal επικεντρώνεται σε ένα μεγάλο, αλλά χαμηλής ποιότητας κοιτάσμα 0,07 % κ.μ. ΣΟΣΓ με σημαντικές συγκεντρώσεις ΒΣΓ (50%). Το κοιτάσμα ΣΓ στο Aksu Diamas θεωρείται ως βαριά συγκέντρωση ορυκτών από μη στερεοποιημένα πυροκλαστικά υλικά. Τα πετρώματα του κοιτάσματος θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν ξεπερασμένους τόφους. Ο τύπος κοιτάσματος θεωρείται ως πρωτεύον κοιτάσμα που σχετίζεται με τον πυροκλαστικό ηφαιστειακό, με διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα στα λεπτά και βαριά μεταλλικά στοιχεία που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες. Οι συναγόμενοι πόροι υπολογίζονται σε 494 εκ.τ, ενώ δεν έχει δημοσιευθεί εκτίμηση για ενδεικνυόμενους ή μετρούμενους ορυκτούς πόρους. Τα κύρια ορυκτά που έχουν ενδιαφέρον όσον αφορά τις ΣΓ είναι ο αλλανίτης, ο σεβκινίτης και η σφαίνη (τιτανίτης) ενώ κατά την εξόρυξη υποπροϊόντα όπως το ζirkόνιο, το τιτάνιο, το νιόβιο, το ουράνιο και το θόριο αναμένεται να συνεισφέρουν στα οικονομικά του έργου(11).

3.2.8 Υπόλοιπη Ευρώπη και κρισιμότητα

Η Ευρώπη όπως βλέπουμε στην (Εικόνα 11) διαθέτει αρκετές αναγνωρισμένες αποθέσεις που βέβαια δεν έχουν προχωρήσει σε εξόρυξη για λόγους που θα μελετήσουμε παρακάτω (Πίνακας 8). Αν και η Ευρώπη έχει επικεντρωθεί σε άλλους τομείς, εντούτοις η διασφάλιση επαρκούς παροχής σπάνιων γαιών στο μέλλον παραμένει μια επιτακτική ανάγκη και σημαντική πρόκληση για τις ευρωπαϊκές κυβερνήσεις και τη βιομηχανία. Οι αγορές σπάνιων γαιών είναι μικρές, έτσι η συνολική αξία αγοράς για τον διαχωρισμό των σπάνιων γαιών ήταν μεταξύ 3 δισεκατομμυρίων δολαρίων και 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων το 2013, ενώ η ετήσια παγκόσμια παραγωγή θα χωρούσε σε ένα μεγάλο φορτηγό φορτίου χύδην. Παρόλα αυτά, οι σπάνιες γαίες είναι σημαντικές για προηγμένα υλικά σε μια σειρά βιομηχανιών υψηλής τεχνολογίας και έχουν ιδιαίτερο βασικό ρόλο στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και της αποδοτικότητας των πόρων που τις καθιστά πολύ κρίσιμες για να τις αγνοήσουμε(52).



Εικόνα 11: Διάγραμμα των αναγνωρισμένων τύπων εμφανίσεων ΣΓ ανά χώρα στην Ευρώπη.

Πίνακας 8: Ονομαστική αναφορά των εμφανίσεων/κοιτασμάτων της Ευρώπης(48).

Τοποθεσία	Χώρα	Τύπος	Ταξινόμηση κοιτάσματος
Aksu Dıamas	Τουρκία	Προσχωματικά κοιτάσματα	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Alnö	Σουηδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Arran, Skye, Mourne Mountains	H.B.	Γρανίτης κ Πηγματίτης	Εμφάνιση
Biggejavri	Νορβηγία	Υδροθερμικό	Εμφάνιση
Delitzsch (Storkwitz)	Γερμανία	Ανθρακίτης	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Ditrău	Ρουμανία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Κοίτασμα
Fen	Νορβηγία	Ανθρακίτης	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Galiñeiro	Ισπανία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Κοίτασμα
Gardiner Complex	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Grønnedal-Ika	Γροιλανδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Grängesberg-Blötberget	Σουηδία	Οξειδίο σιδήρου- απατίτης	Υποπροϊόν από σίδηρο
Halpanen	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Høgtuva	Νορβηγία	Υδροθερμικό	Εμφάνιση
Iivaara	Φιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Ivigut	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Jämtland	Σουηδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Kaiserstuhl	Γερμανία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Katajakangas	Φιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Κοίτασμα
Kiruna-Malmberget	Σουηδία	Οξειδίο σιδήρου- απατίτης	Υποπροϊόν από σίδηρο
Kodal	Νορβηγία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Υποπροϊόν από απατίτη
Korsnäs	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Κοίτασμα
Kringlerne	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Krušné hory	Δημοκρατία της Τσεχίας	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Kvanefjeld	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Lamujärvi	Φιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Loch Loyal	H.B.	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Μεσογειακοί Βωξίτες	Ιταλία, Ελλάδα, Τουρκία	Βωξίτης	Υποπροϊόν από αλουμίνιο
Milne Land	Γροιλανδία	Προσχωματικά κοιτάσματα	Εμφάνιση
Misværdal	Νορβηγία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Κοίτασμα
Motzfeldt	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή της NI-43-101
Naantali	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Νέα Πέραμος, Στρυμονικός κόλπος	Ελλάδα	Προσχωματικά κοιτάσματα	Εμφάνιση
Nettuno	Ιταλία	Προσχωματικά κοιτάσματα	Εμφάνιση
Norberg	Σουηδία	Υδροθερμικό	Κοίτασμα
Norra Kärr	Σουηδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
North Qôroq	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Κοίτασμα

Olserum	Σουηδία	Υδροθερμικό	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Παλαιοζωικοί μοναζίτες σε κονδυλώδεις	H.B., Βέλγιο, Γαλλία, Πορτογαλία	Διαγενητικό	Εμφάνιση
Petäiskoski/Juuka	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Qaqarssuk	Γροιλανδία	Ανθρακίτης	Κοίτασμα
Riddarhyttan-Bastnäs	Σουηδία	Υδροθερμικό	Κοίτασμα
Säteråsen	Νορβηγία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
San Venanzo, Polino, Cupaello and Monte Vulture	Ιταλία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Sarfartoq	Γροιλανδία	Ανθρακίτης	Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC ή NI-43-101
Siilinjärvi	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Υποπρόϊόν από απατίτη
Skjoldungen	Γροιλανδία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Sofular	Τουρκία	Ανθρακίτης	Κοίτασμα
Sokli	Φιλανδία	Ανθρακίτης	Κοίτασμα
Svecofennian πηγματίτες	Φιλανδία, Σουηδία	Γρανίτης κ Πηγματίτης	Εμφάνιση
Sveconorwegian πηγματίτες	Νορβηγία, Σουηδία	Γρανίτης κ Πηγματίτης	Εμφάνιση
Tajno	Πολωνία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Tikisaaq	Γροιλανδία	Ανθρακίτης	Κοίτασμα
Třebíč	Δημοκρατία της Τσεχίας	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Tupertalik	Γροιλανδία	Ανθρακίτης	Εμφάνιση
Tysfjord	Νορβηγία	Αλκαλικό πυριγενές πέτρωμα	Εμφάνιση
Västervik	Σουηδία	Προσχωματικά κοιτάσματα	Εμφάνιση

Η ταξινόμηση των κοιτασμάτων χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες: **1)** Συμμορφούμενα στις προδιαγραφές και τις αναφορές της JORC (ο Αυστραλιανός Κώδικας για την Αναφορά Ορυκτών Πόρων και Αποθεμάτων Μεταλλεύματος) ή της NI-43-101 (ο κώδικας για την αναφορά και την εμφάνιση πληροφοριών που σχετίζονται με μεταλλευτικές ιδιότητες που ανήκουν ή διερευνούνται από εταιρείες που αναφέρουν αυτά τα αποτελέσματα σε χρηματιστήρια του Καναδά), πλήρη αναφορά των πόρων του κοιτάσματος. **2)** Κοίτασμα, με συγκέντρωση ορυκτών υλών η οποία είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμη και μπορεί να γίνει μελλοντική εξερεύνηση. **3)** Υποπρόϊόν, ονομάζεται η εκμετάλλευση σπάνιων γαιών που θα μπορούσαν να είναι κερδοφόρες ως υποπρόϊόν άλλου εμπορεύματος. **4)** Εμφάνιση, δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμη λόγω μεγέθους ή περιεκτικότητας

3.3.1 Εμφανίσεις στην Ελλάδα με «Προοπτική»

Σπάνιες Γαίες στην Ελλάδα εμφανίζονται σε διάφορα μέρη και βρίσκονται σε πυριγενή, ιζηματογενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα διαφορετικών ηλικιών. Ο εμπλουτισμός των σπάνιων γαιών μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- πρωτογενείς τύποι, που σχηματίζονται γενικά από πυριγενείς ή υδροθερμικές διεργασίες.
- δευτερογενείς τύποι, στους οποίους οι ΣΓ ήταν περαιτέρω συμπυκνωμένες από πρωτογενή εμπλουτισμό μέσω ιζηματογενών διεργασιών ή καιρικών συνθηκών.

Οι δευτερογενείς τύποι είναι οικονομικά τα πιο σημαντικά είδη στην Ελλάδα. Συνεπώς οι πιο υποσχόμενες πηγές ΣΓ στην Ελλάδα μπορεί να είναι τα κοιτάσματα από βωξίτες και λατερίτες στην κεντρική Ελλάδα και άμμοι με βαριά ορυκτά που έχουν εντοπιστεί κατά μήκος της παραθαλάσσιας περιοχής της βορειοανατολικής Ελλάδας. Τα συλλεγόμενα δείγματα από την παραθαλάσσια άμμο αποτελούνται κυρίως από ορυκτούς κρυστάλλους μικρού μεγέθους που προέρχονται βασικά από γειτονικά γρανιτοειδή πετρώματα(59).

3.3.2 Βόρεια Ελλάδα

Σπάνιες γαίες σε προσχωματικά κοιτάσματα συναντούμε στις περιοχές της Νέας Περάμου, του Στρυμονικού κόλπου, περιμετρικά της υφαλοκρηπίδας της Σαμοθράκης μέχρι το δέλτα του Έβρου .

Η περιοχή γεωλογικά ανήκει στην κατώτερη τεκτονική ενότητα του ορεινού όγκου της Ροδόπης, αποτελείται από ογκώδη μάρμαρα, μίκα γνεύσια, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, ασβεστοπηριτικούς σχιστόλιθους και αμφιβολίτες. Στα πλουτωνικά πετρώματα στην περιοχή της Ροδόπης (Σάπες, Μαρώνεια, Μελιταίνα, Κίρκη) συνήθως συναντάμε μονζονίτες, γρανοδιорίτη με μικρότερες ποσότητες γάβρου. Ενώ τα πλουτωνικά πετρώματα στην περιοχή της Καβάλας έχουν κυρίως γρανοδιорίτη, αμφίβολο και βιοτίτη και μικρότερες ποσότητες διορίτη, τοναλίτη, μονζογρανίτη και μονζοδιорίτη. Οι χημικές αναλύσεις σε αντιπροσωπευτικά δείγματα από την περιοχή της Καβάλας έδειξαν αυξημένες τιμές σε La (930 ppm), Ce (992 ppm), Nd (318ppm), Y (55ppm) και Pr (98ppm). Στη Βάθη του Κιλκίς πετρώματα πορφυρίτη Au-Cu έχουν σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε La (500 ppm) και Ce (715 ppm)(59–61).

3.3.3 Κεντρική Ελλάδα

Στην Ελλάδα, εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα βωξιτών υπάρχουν κυρίως στις περιοχές του Παρνασσού, της Γκιώνας, του Ελικώνα και στην Εύβοια. Τα αποθέματα βωξίτη είναι περίπου 70 εκ.τ που τα κατατάσσει στα ένατα μεγαλύτερα αποθέματα βωξίτη παγκοσμίως. Οι ελληνικοί βωξίτες καρστικού τύπου στην περιοχή Παρνασσού-Γκιώνας είναι σχετικά εμπλουτισμένα σε ΣΓ και ιδιαίτερα σε ΕΣΓ, ενώ η συγκέντρωση ΒΣΓ είναι πολύ χαμηλότερη. Βάσει αναφορών της περιοχής η μέση τιμή των σπάνιων γαιών στους βωξίτες και τους λατερικούς βωξίτες της κεντρικής Ελλάδας κυμαίνονται 500-1200 ppm φτάνοντας σε κάποια σημεία και τα 6440 ppm

όπως στην κατώτερη ζώνη στο νησί Άγιος Ιωάννης που χαρακτηρίζεται από βωξίτη και νικέλιο. Μαζί με τις ΣΓ (Y, Sc, Ce, Nd) οι βωξίτες είναι εμπλουτισμένοι και με άλλα στοιχεία υψηλής ισχύος πεδίου όπως Th, U, Ta, Nb, Zr και Hf και με ορισμένα συμβατά στοιχεία όπως Ni, V και Cr. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση που βρέθηκε σε ΣΓ από τους βωξίτες είναι πολύ χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτό της ελληνικής ερυθράς ιλύος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η αξία του υπολειμματικού βωξίτη (κόκκινη λάσπη) αυξήθηκε με διπλάσιο ρυθμό σε σχέση με τον βιομηχανικό βωξίτη. Η μελέτη βωξίτη στο ορυχείο του Πέρα Λάκκου (περιοχή ανάμεσα Γκιώνας-Παρνασσού) έδειξε ότι οι ΣΓ συγκεντρώνονται κυρίως σε κατώτερα στρώματα πλούσια σε Fe και επίσης στο στρώμα άνθρακα που επικαλύπτει την απόθεση και αποτελούνται από ΕΣΓ και κυρίως Ce. Λίγο πιο νότια γρανίτης που φέρει Pb,Zn,Cu από το κοίτασμα στο Λαύριο έχει βρεθεί με 428 ppm La και 976 ppm Ce(60–62).

3.3.4 Νησιωτική Ελλάδα

Σε πολλά νησιά της Ελλάδας συναντάμε γρανίτη αλλά ο πιο σημαντικός φαίνεται να είναι ο γρανίτης της Σαμοθράκης. Στο νοτιοδυτικό τμήμα της ορυκτά που φέρουν σπάνιες γαίες είναι αλλανίτης, ζirkονίτης και τιτανίτης. Η αναλογία των σπανίων γαιών στο ορυκτό του αλλανίτη μπορεί να φτάσει στο 20% (κυρίως Ce). Ενώ αλλανίτης έχει βρεθεί και στο κομμάτι της κεντρικής Κρήτης με χαμηλά ποσοστά σε περιεκτικότητα. Σπάνιες γαίες συναντάμε και στην παραθαλάσσια βαριά ορυκτή άμμο από την αττικοκυκλαδική ζώνη (Ικαρία, Μύκονος, Νάξος, Σέριφος, Πάρος, Τήνος). Η Μύκονος παρουσιάζει υψηλή αφθονία σπανίων γαιών σε σχέση με τα υπόλοιπα νησιά. Η παραθαλάσσια άμμος της Νάξου εμφανίζει επίσης σπάνιες γαίες και ακτινίδες, σε ποσοστό συγκρίσιμο με αυτόν της Μυκόνου. Σε άλλες περιοχές όπως η Πάρος, η Τήνος, η Σέριφος και η Ικαρία, οι συγκεντρώσεις σπανίων γαιών δεν είναι εμφανίζουν εμπορική αξία. Πιο συγκεκριμένα, στα δείγματα παράκτιας άμμου από τη Σέριφο κυριαρχούν ορυκτά φτωχά σε σπάνιες γαίες όπως το επίδοτο, ο γρανάτης και το πυροξένιο (59,63,64).

3.4 Η αναγκαιότητα καθιέρωσης κριτηρίων βελτιστοποίησης των έργων εκμετάλλευσης Σπανίων Γαιών.

Στη συνέχεια των παραπάνω αναφορών, γίνεται φανερό ότι οι προσπάθειες για τη δημιουργία μια αλυσίδας αξίας ΣΓ εκτός Κίνας έχουν σε μεγάλο βαθμό αποτύχει. Αυτό περιλαμβάνει τις προσπάθειες δημιουργίας ενός ενεργού τομέα εξόρυξης στον τομέα αυτό, ενώ η αστική εξόρυξη και η ανακύκλωση σπάνιων γαιών βρίσκονται ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο. Επομένως, τα θεμελιώδη μεγέθη του τομέα των ΣΓ δεν έχουν αλλάξει, αλλά μπορεί μάλλον να γίνουν ακόμη πιο τεταμένα.

Ο τομέας εξόρυξης είναι η ρίζα της βιομηχανίας ΣΓ. Για αυτό, η βελτίωση της διαδικασίας εξόρυξης μπορεί να ενισχύσει τις προοπτικές της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας ΣΓ. Απαιτείται μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των τμημάτων της παραγωγικής διαδικασίας καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας.

Δεν είναι δυνατή η πλήρης βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκμετάλλευσης σε ένα έργο σπάνιων γαιών χωρίς να ληφθούν υπόψη οι διαδικασίες μεταλλουργικής επεξεργασίας και αντίστροφα. Αλλά συχνά, το ένα ή το άλλο αναθεωρείται κατά τα στάδια προ-σκοπιμότητας ή σκοπιμότητας ενός έργου εξερεύνησης σπάνιων γαιών, με την προϋπόθεση ότι η άλλη διαδικασία παραμένει αμετάβλητη. Ο σχεδιασμός μιας μεταλλουργικής μονάδας θα πρέπει να γίνει στο πλαίσιο της ευρύτερης αξιολόγησης του ερευνητικού έργου.

Η ουσία είναι ότι οι αξιολογήσεις όλων αυτών των διαδικασιών στο σύνολό τους είναι μια περίπλοκη εργασία και τα λανθασμένα παραδείγματα αξιολόγησης εξόρυξης στο πρόσφατο παρελθόν δείχνουν ότι υπάρχει περιθώριο βελτίωσης. Οι μελέτες προκαταρκτικής σκοπιμότητας και σκοπιμότητας παρέχουν μια ευρεία εικόνα των πιθανών έργων εξόρυξης ΣΓ χωρίς να υπεισέρχονται σε λεπτομέρειες για ορισμένες πτυχές των εργασιών. Όπως περιγράφεται στη συνέχεια, κανένα από τα ήδη γνωστά εργαλεία αξιολόγησης εξόρυξης και τεχνικές επιλογής μεθόδων εξόρυξης δεν λαμβάνει υπόψη πολλά από αυτά τα κριτήρια, πολλά από τα οποία είναι ειδικά για τη βιομηχανία εξόρυξης ΣΓ(11).

4. Ανάλυση των Παραμέτρων Αξιολόγησης και Εκμετάλλευσης Σπανίων Γαιών

4.1 Αξιολόγηση Εξόρυξης Σπανίων Γαιών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίστηκαν οι περιοχές που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο σε πανευρωπαϊκό επίπεδο και τον Ελλαδικό χώρο. Σε αυτό το κεφάλαιο σκοπός είναι να γίνει μια εις βάθος ανάλυση αυτών των συνθηκών προκειμένου να εντοπιστούν όλοι οι συντελεστές εισόδου και τα ειδικά κριτήρια για τη βιομηχανία σπανίων γαιών και να αναπτυχθεί ένα σύστημα παραγόντων που μπορεί να καλύψει όλες τις πιθανές πτυχές αξιολόγησης της βιωσιμότητας ενός έργου σπανίων γαιών. Αφού οριστούν, αυτοί οι παράγοντες ταξινομούνται σε διακριτές κατηγορίες, ώστε οι παράγοντες που ανήκουν στην ίδια κατηγορία να μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν και να συγκριθούν μεταξύ τους.

Ωστόσο πριν φτάσουμε στο σημείο να κατηγοριοποιήσουμε τα κριτήρια αξιολόγησης εξόρυξης ενός ορυχείου, είναι απαραίτητο να τα αναλύσουμε. Η διαδικασία ολοκληρωμένου σχεδιασμού ορυχείων περιλαμβάνει:

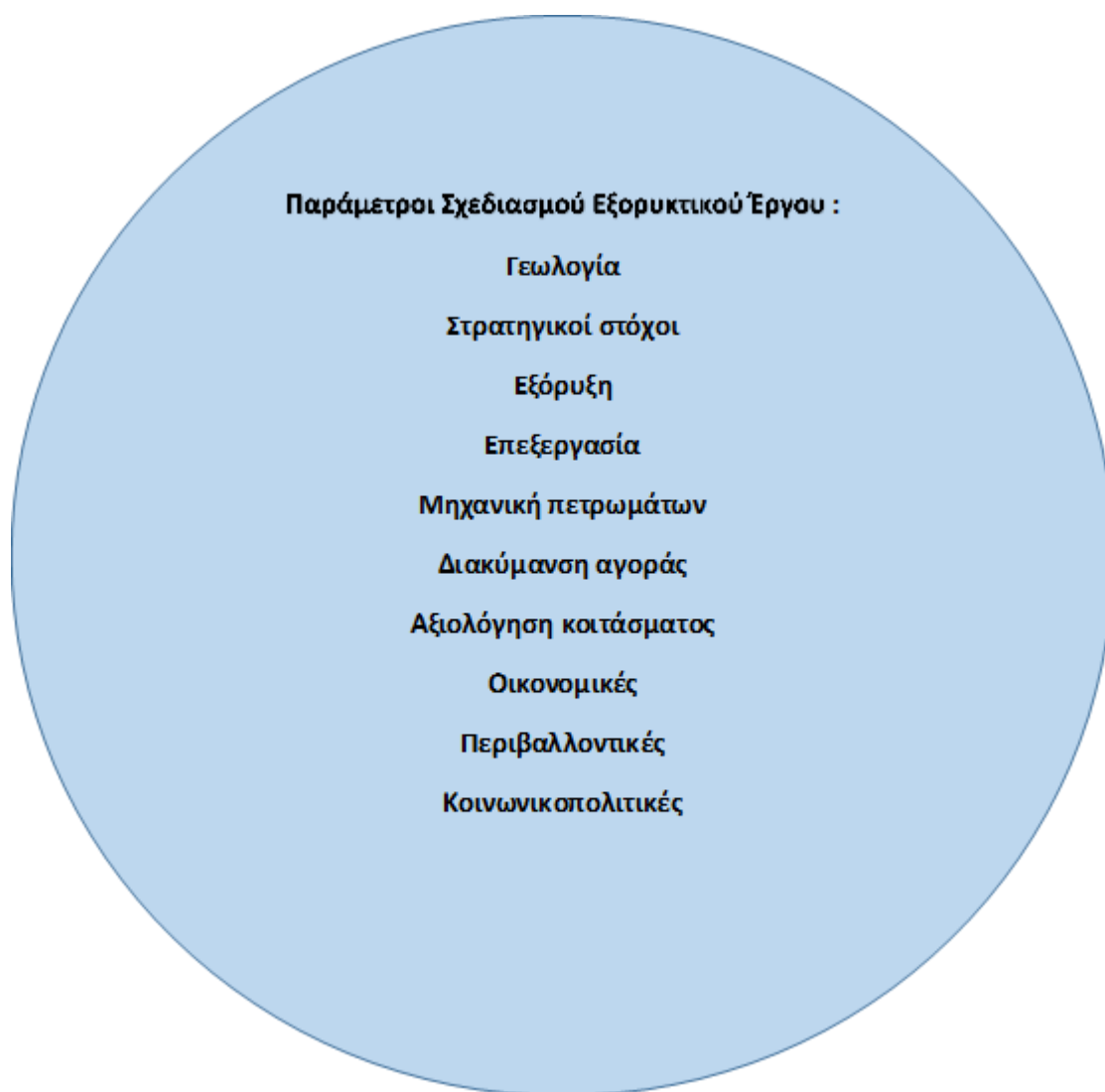
- προσδιορισμό του όγκου και του βαθμού των κοιτασμάτων.
- εξέταση και δοκιμή μεθόδων εκχύλισης και μεταλλουργικών ή διεργασιών επεξεργασίας.
- τοπογραφικές απαιτήσεις μεταφοράς και υποδομής, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές μιας επιχείρησης και τη διεξαγωγή μελετών αγοράς και χρηματοδότησης.

Προκειμένου να ξεκινήσουν οι εργασίες εξόρυξης, το κοίτασμα των σπανίων γαιών πρέπει να είναι αρκετά πλούσιο ώστε να καλύπτει το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής (κεφαλαιουχικό κόστος ή δαπάνες - CAPEX), το κόστος λειτουργίας του ορυχείου και το κόστος επεξεργασίας των σπανίων γαιών (λειτουργικά έξοδα ή δαπάνες - OPEX), καθώς και το κόστος για το κλείσιμο και την αποκατάσταση του ορυχείου. Εν ολίγοις, η οικονομική βιωσιμότητα του έργου

είναι ιδιαίτερως σημαντική. Επιπλέον, για να γίνει η ανάπτυξη ενός έργου σπάνιων γαιών πρέπει αφ' ενός να περιοριστούν οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και αφ' ετέρου η εκτέλεσή του να αποφέρει κοινωνικά και οικονομικά οφέλη για την εταιρεία εξόρυξης, τις τοπικές κοινότητες και την περιοχή ή την χώρα γενικότερα. Ωστόσο, οι ιδιαιτερότητες της βιομηχανίας σπανίων γαιών προσθέτουν περαιτέρω παραμέτρους σε αυτήν την ήδη πολύπλοκη διαδικασία αξιολόγησης(11,54).

Κομβικό σημείο της μεταλλουργικής επεξεργασίας των ΣΓ είναι η απόκτηση τους στην μορφή οξειδίων. Τα οξείδια των ΣΓ είναι τα τελικά προϊόντα της απομόνωσης και διαχωρισμού ορυκτών. Τα οξείδια των ΣΓ θεωρούνται ως αρχικό υλικό για την απομόνωση του μετάλλου μετά από αναγωγή τους. Τα οξείδια αυτά είναι αρκετά σταθερά και η αναγωγή τους συνθέτη και δύσκολη διαδικασία. Η μετατροπή των οξειδίων ΣΓ σε αλογονίδια -halogonide (αλλιώς αλίδια -halide) των ΣΓ και ακολούθως η αναγωγή των αλογονιδίων προς ανάκτηση του μετάλλου ΣΓ, είναι η διαδικασία που ακολουθείται και βασίζεται σε γνωστά βήματα που εκμεταλλεύονται τις εγγενείς ιδιότητες των αλογονιδίων να μετατρέπονται σε μέταλλα(41).

Συνδυασμένες χημικές και ηλεκτρολυτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της αναγωγής. Κάθε μέθοδος και διαδικασία απομόνωσης μετάλλων ΣΓ έχει πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Οι σπάνιες γαίες επειδή έχουν ποικιλία ιδιοτήτων, όπως το σημείο ζέσεως και το σημείο εξάτμισης, ή αυξημένη σταθερότητα σε κάποιες από αυτές λόγω δυσθενοφιλούς φορτίου που έχουν, απαιτούν συνδυαστική και πολυπαραγοντική στρατηγική αναγωγής των αλογονιδίων. Η τελική κάθε φορά επιλογή θα πρέπει να παίρνει υπόψη το είδος του μετάλλου και τη φύση του ορυκτού, την καθαρότητα σε μέταλλο ΣΓ, το μέγεθος του προς επεξεργασία φορτίου, την τεχνολογική επάρκεια και υποστήριξη και το οικονομικό όφελος. Η εταιρεία εξόρυξης πρέπει να αξιολογήσει τις προοπτικές της αγοράς σε σχέση με τα τελικά προϊόντα (εάν αυτά τα προϊόντα θα είναι μόνο οξείδια σπανίων γαιών ή θα προχωρήσει σε περαιτέρω επεξεργασία και διαχωρισμό των οξειδίων) και να καθορίσει την οικονομική της στρατηγική με βάση τις διακυμάνσεις των τιμών και τις τάσεις της αγοράς(41). (Εικόνα 12)



Εικόνα 12: Παράμετροι σχεδιασμού εξορυκτικού έργου(11).

Θα υπάρχουν επίπεδα αβεβαιότητας σε αρκετές παραμέτρους της διαδικασίας αξιολόγησης της εξόρυξης. Σε πολλές περιπτώσεις, η αβεβαιότητα θα είναι τέτοια που τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να θεωρηθούν αναξιόπιστα. Μερικές φορές, υπάρχει η τάση να αφήνονται τέτοιοι παράγοντες αξιολόγησης εκτός διαδικασίας, έτσι ώστε να περιλαμβάνονται εύλογα μόνο ορισμένα κριτήρια. Ωστόσο, αυτή είναι μια εσφαλμένη πολιτική, καθώς η επιρροή αβέβαιων παραμέτρων μπορεί να είναι κρίσιμη. Οι τιμές των σπάνιων γαιών, για παράδειγμα, είναι πιθανώς ένας από τους πιο αστάθμητους παράγοντες όπως είδαμε και στο 2^ο κεφάλαιο. Ορισμένες από αυτές τις συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν ή ακόμα και να αλλάξουν κατά την ανάπτυξη ή τη λειτουργία του έργου, ενώ άλλες δεν μπορούν να τροποποιηθούν από την στιγμή που θα ξεκινήσει η παραγωγή και το έργο βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία . Αυτό δείχνει

ότι η αξιολόγηση όλων των παραγόντων είναι μια κρίσιμη διαδικασία που πρέπει να ολοκληρωθεί πριν από οποιαδήποτε ανασκαφική δραστηριότητα. Αυτή η αρχή προσδιορίζει εάν το δυνητικό έργο εξόρυξης έχει προοπτικές βιωσιμότητας ή όχι. Προστατεύει την ανθρώπινη και περιβαλλοντική ασφάλεια και ευημερία και βελτιστοποιεί τις εργασίες εξόρυξης σε σχέση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και το μέγιστο δυνατό κέρδος. Όσον αφορά την υπόγεια εξόρυξη, η αναγκαιότητα μιας σωστής αξιολόγησης γίνεται ακόμη μεγαλύτερη, διότι μόλις υιοθετηθεί μια μέθοδος υπόγειας εξόρυξης, είναι σχεδόν αδύνατο να αλλάξει κατά τη διάρκεια της πραγματικής ζωής του ορυχείου(54).

4.2 Κατηγοριοποίηση Παραγόντων Αξιολόγησης

Οι παράγοντες για την αξιολόγηση της εξόρυξης για σπάνιες γαίες παρουσιάζονται στη συνέχεια. Οι παράγοντες που επισημαίνονται στις επόμενες σελίδες επικεντρώνονται στις συγκεκριμένες οριακές συνθήκες της βιομηχανίας των σπάνιων γαιών και θα αποτελέσουν τη βάση για να σχηματιστεί μια δεξαμενή κριτηρίων αξιολόγησης ταξινομημένων σε κατηγορίες.

4.2.1. Γεωλογικοί /Γεωτεχνικοί Παράγοντες

Οι **γεωλογικοί παράγοντες** ενός κοιτάσματος μεταλλευμάτων σπανίων γαιών είναι η βάση οποιασδήποτε δραστηριότητας σχεδιασμού ορυχείων. Γενικά, αποτελείται από τα φυσικά, γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του. Τα χωρικά χαρακτηριστικά όπως το βάθος, το σχήμα μαζί με το μέγεθος (μήκος, πλάτος και πάχος) του σώματος του μεταλλεύματος, και η κανονικότητα των ορίων του μεταλλεύματος είναι βασικοί παράγοντες αξιολόγησης. Οι φυσικές παράμετροι ενός κοιτάσματος σπανίων γαιών συχνά αποκλείουν τη χρήση πολλών μεθόδων εξόρυξης, ενώ η ύπαρξη προηγούμενης εξόρυξης μπορεί να επιβάλλει την χρησιμοποίηση μιας συγκεκριμένης μεθόδου εξόρυξης(54).

Τα χωρικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με την προέλευση και τη γεωλογική ιστορία των κοιτασμάτων, τα οποία επηρεάζουν τη δομή του κοιτάσματος και την απόκριση της βραχομάζας στην εξόρυξη. Ομοίως, η αναμενόμενη διαμόρφωση των μεταλλευμάτων που έχουν σπάνιες γαίες μπορεί να προκαθοριστεί με βάση τους κύριους τύπους κοιτασμάτων με σπάνιες γαίες που συναντήσαμε νωρίτερα (κεφ 2.3).

Η κατανομή του βαθμού σπανίων γαιών στο σώμα του μεταλλεύματος είναι εξίσου σημαντική. Η διακύμανση της ποιότητας των ορυκτών μέσω του όγκου του μεταλλεύματος καθορίζει τόσο τη στρατηγική εξόρυξης όσο και την πρακτική λειτουργίας. Περαιτέρω σημαντικές γεωλογικές παράμετροι είναι η ορυκτολογία, η χημική σύσταση, οι καιρικές διακυμάνσεις που προκαλούν διάβρωση, αποσάθρωση και εναπόθεση και οι μεταμορφώσεις σε ένα κοίτασμα μεταλλεύματος σπάνιων γαιών. Μια σχετικά απλή ορυκτολογία μπορεί να είναι το κλειδί για χαμηλότερο κόστος σε μια εξόρυξη σπανίων γαιών όταν πρόκειται για την επεξεργασία του μεταλλεύματος. Επιπλέον, η ίδια η δομή των άχρηστων πετρωμάτων μπορεί να καθορίσει τη διαδικασία επεξεργασίας. Οι αποθέσεις σπανίων γαιών με απλή μικροδομή μπορούν να περιέχουν σύνδρομα ορυκτά που είναι πιο εύκολα στον διαχωρισμό από άλλα, υποδηλώνοντας σημαντική δυνατότητα χαμηλού κόστους, διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητα. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη ραδιενεργών υλικών μπορεί να περιπλέξει την επεξεργασία των σπάνιων γαιών. Εξαιρουμένου του μοναζίτη, του μπαστνασίτη και του ξενότιμου, πολύ λίγα από τα υπόλοιπα ορυκτά που έχουν σπάνιες γαίες έχουν υποστεί εμπορική επεξεργασία(11).

Τα υδρολογικά δεδομένα όπως η παρουσία υπόγειων υδάτων και το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα συνήθως δεν επηρεάζουν την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης, εκτός από τον προσδιορισμό της σκοπιμότητας της επιτόπιας απολίπανσης. Ωστόσο, το υπόγειο νερό είναι το μέσο κυκλοφορίας που μπορεί να μεταφέρει ατμοσφαιρικά αντιδρώντα και άλλους ρύπους (π.χ. ραδόνιο) στη γεωσφαίρα, και επομένως η παρουσία του μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό του συστήματος εξόρυξης(11).

Πέρα από τη κατανόηση των γεωλογικών παραγόντων εξίσου κοντινοί είναι και οι **γεωτεχνικοί παράγοντες** της τοποθεσίας, που πρέπει να καθοριστούν οι γεωμηχανικές ιδιότητες έτσι ώστε να παρέχεται μια συνολική εικόνα του κοιτάσματος. Η απόκριση μιας βραχώμαζας στην εξόρυξη αντανακλά τη μηχανική και δομική σύσταση του πετρώματος, του ορυκτού και του εξωτερικού βράχου που βρίσκεται περιμετρικά. Οι γεωμηχανικές ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης, όπως ελαστικές, πλαστικές ή ιξωδοελαστικές ιδιότητες όπως και ιδιότητες ερπυσμού. Επιπλέον, η συμπεριφορά της βραχομάζας ορίζεται από την ύπαρξη διεισδυτικών ασυνεχειών, ρηγμάτων, ζωνών διάτμησης και τις ιδιότητες των συνολικών αρθρώσεων του βράχου. Σημαντικές παράμετροι είναι επίσης η κατάσταση τάσης πριν από την εξόρυξη για την κατασκευή του στύλου προστασίας και το τοπικό τεκτονικό περιβάλλον. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν εύκολα

να ποσοτικοποιηθούν χρησιμοποιώντας έναν αριθμό συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας, τα οποία αποτελούν πολύτιμο βοήθημα για την αξιολόγηση της πιθανής επίδρασης της συμπεριφοράς των πετρωμάτων σε ένα έργο εξόρυξης, στα αρχικά στάδια(11).

4.2.2 Τεχνικοί και Λειτουργικοί Παράγοντες

Ενώ οι παραπάνω παράγοντες είναι το αρχικό στάδιο της αξιολόγησης θα πρέπει να γίνουν και περαιτέρω αξιολογήσεις για να φτάσουμε να έχουμε ασφαλή συμπεράσματα για να προχωρήσει το έργο. Για την αξιολόγηση και την κατασκευή ενός έργου, η διάρκεια μπορεί να είναι από μερικούς μήνες έως αρκετά χρονιά, ανάλογα το μέγεθος, την τοποθεσία, την τοπογραφία και τη μέθοδο εξόρυξης που θα χρησιμοποιηθεί, που μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του κόστους. Είναι σημαντικό επίσης, εάν η εκμετάλλευση είναι υπαίθρια ή υπόγεια (π.χ. οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις σπανίων γαιών χρειάζονται ανάπτυξη σημαντικών υποδομών στο βράχο υποδοχής).

Σημαντική παράμετρος είναι η εξοπλιστική αξία, όπως η αγορά ή μίσθωση εξοπλισμού του ορυχείου, εφόσον αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό κόστους άρα είναι υψίστης σημασίας για μια εξόρυξη σπάνιων γαιών. Εκτός από τις απαιτήσεις κόστους και παραγωγής, η επιλογή του εξοπλισμού εξαρτάται επίσης από πιθανούς περιβαλλοντικούς περιορισμούς (π.χ. εκπομπές αερίου ραδονίου ή επίπεδα θορύβου) και τις ειδικές συνθήκες του ορυχείου.

Σήμερα η εξόρυξη στρέφεται προς την αυτοματοποίηση και την ολοκληρωμένη εξόρυξη μέσω υπολογιστικών συστημάτων, με γνώμονα την ανάγκη βελτίωσης της παραγωγικότητας και της κερδοφορίας, ενώ τηλεκατευθυνόμενα μηχανήματα μπορούν να απομακρύνουν ανθρώπους από περιοχές υψηλού κινδύνου και να κάνουν την εξόρυξη ασφαλέστερη. Ωστόσο, η ικανότητα μηχανοποίησης και αυτοματοποίησης των εργασιών δεν είναι εφικτή για όλες τις μεθόδους εξόρυξης και ούτε στον ίδιο βαθμό.

Αλλαγές στις οριακές συνθήκες μπορούν να υπαγορεύσουν αλλαγές σε παραμέτρους όπως ο ρυθμός παραγωγής. Για αυτούς τους λόγους, η ευελιξία στην αλλαγή των μεθόδων εξόρυξης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αξιοσημείωτος παράγοντας αξιολόγησης. Επιπλέον, η επιλεκτική εξόρυξη σπανίων γαιών πρέπει να αξιολογείται σε σχέση με τις παραγωγικές και μεταποιητικές ικανότητες του συνολικού έργου.

Οι εκτιμήσεις ανάκτησης και αραίωσης αποτελούν απαραίτητη εξέταση σε μια αξιολόγηση σχεδιασμού ορυχείων σπανίων γαιών. Αυτές οι εκτιμήσεις απαιτούν την κατανόηση της γεωλογίας του ορυχείου, της ανατίναξης ή της μηχανικής εκσκαφής, του εξοπλισμού εξόρυξης και της επεξεργασίας ορυκτών. Η προβλεπόμενη αραίωση μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων και να αξιολογηθεί στα οικονομικά του έργου. Από την άλλη πλευρά, η απροσδόκητη αραίωση μπορεί να είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, ειδικά για ένα οριακό έργο σπανίων γαιών, σε βαθμό που η ποιότητα του μεταλλεύματος να φτάσει σε σημείο να γίνει αντισυμβατική για την επεξεργασία.

Η συνολική ανάκτηση σπάνιων γαιών εξαρτάται τόσο από τις εργασίες εξόρυξης όσο και από τις εργασίες εμπλουτισμού και μεταλλουργικής επεξεργασίας. Η ανάκτηση μεταλλεύματος σπανίων γαιών εξαρτάται από τη μέθοδο εξόρυξης και μετά την αφαίρεση απρόσιτων ή μη οικονομικών μπλοκ. Η επεξεργασία της ανάκτησης σπάνιων γαιών μπορεί να διαχωριστεί στην πρωτογενή αξιοποίηση και στην ακόλουθη υδρομεταλλουργική ανάκτηση στοιχείων σπάνιων γαιών. Εξαρτώνται από την ορυκτολογία του κοιτάσματος και από τις τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται, ενώ συχνά συνδέεται με αυξημένο κόστος λόγω της δυσκολίας στον εμπλουτισμό, στον διαχωρισμό και στην ανάγκη ακραίων συνθηκών για τη διαλυτοποίηση των σπανίων γαιών.

4.2.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες και Κριτήρια Ασφάλειας

Όλες οι εκμεταλλεύσεις σπανίων γαιών μπορούν να έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Δίνοντας προσοχή στις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις, πρέπει να αξιολογηθούν αντίστοιχοι παράγοντες. Συμπερασματικά, η ασφάλεια του εργατικού δυναμικού, η μη διατάραξη της ζωής των τοπικών κοινωνιών και η διατήρηση του περιβάλλοντος αποτελούν βασικά στοιχεία μιας αξιολόγησης εξόρυξης.

Αναμφίβολα μία από τις πιο σημαντικές διαστάσεις της αποτελεσματικής ανάπτυξης είναι η ασφάλεια. Η αυτονόητη αναφορά πλέον για τις ευρωπαϊκές χώρες ότι «το πιο σημαντικό πράγμα που βγαίνει από ένα ορυχείο είναι ο ανθρακωρύχος», του γενικού επιθεωρητή ορυχείων της Γαλλίας Frédéric Le Play το 1855(65), κατατάσσει την ασφάλεια σε κρίσιμη παράμετρο. Ο κύριος στόχος είναι η διατήρηση ασφαλών εκσκαφών σε βράχους και εδάφη μέσω εδάφους

ελέγχου. Επιπλέον, οι εργασίες εξόρυξης που απαιτούν λιγότερο εργαζόμενο προσωπικό στην τοποθεσία, προσφέρουν ένα εγγενές πλεονέκτημα ασφάλειας μειώνοντας την έκθεση του προσωπικού σε κινδύνους. Ανάλογα τις εξορυκτικές εργασίες, μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης και να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος απαιτώντας πρόσθετα μέτρα ασφαλείας.

Στις περιβαλλοντικές παραμέτρους συγκαταλέγεται και η ύπαρξη ραδιενέργειας και ραδιενεργών στοιχείων (Naturally Occuring Radioactive Materials – NORMs) που μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα στην επιφανειακή εξόρυξη, όπου η παραγωγή σκόνης και η πιθανή μεταφορά ραδιενεργών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αυξάνουν τον κίνδυνο μόλυνσης. Το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής εστιάζεται στο ραδόνιο (Rn), καθώς είναι προϊόν αερίου που προέρχεται από διασπάσεις ουρανίου και θορίου, μπορεί να διαρρεύσει μέσω του εδάφους, και έτσι μπορεί εύκολα να μεταναστεύσει στην ατμόσφαιρα ενός υπόγειου ορυχείου, και στα υπόγεια ύδατα, καθώς επίσης και σε κλειστούς χώρους του εργοστασίου μεταλλουργικής επεξεργασίας των σπάνιων γαιών. Η επαγγελματική έκθεση των μεταλλωρύχων και ανθρακωρύχων στο ραδόνιο έχει συσχετιστεί με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία εδώ και δεκαετίες, γεγονός που το καθιστά τη δεύτερη κύρια αιτία καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα. Είναι επομένως σημαντικό να αξιολογηθεί ποια μέθοδος εξόρυξης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε σχέση με τον κατακερματισμό των πετρωμάτων, την παραγωγή σκόνης, τη μακροχρόνια παραμονή υψηλά κατακερματισμένου μεταλλεύματος και τη ‘διάσπαση’ τεμαχιδίων μεταλλεύματος(11).

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η ύπαρξη επαρκούς δικτύου ροής αέρα σε υπόγειο ορυχείο (εξαερισμός), καθώς και σε εσωτερικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Ο ανεπαρκής αερισμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την βραδύτερη απομάκρυνση του ραδονίου, δίνοντας έτσι χρόνο, όχι μόνο στο ραδόνιο αλλά και σε άλλους ρύπους να συσσωρευτούν στην ατμόσφαιρα του ορυχείου. Υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις αερισμού για κάθε μέθοδο εξόρυξης, ενώ η κατανομή της πίεσης είναι πιο δύσκολο να διαχειριστεί όταν πραγματοποιούνται πολλαπλές λειτουργίες ταυτόχρονα σε διάφορα επίπεδα(11).

Ένας άλλος περιβαλλοντικός παράγοντας αφορά την επεξεργασία και διάθεση των απορριμμάτων. Αυτό αφορά τόσο τις επιφανειακές όσο και τις υπόγειες εξορυκτικές εργασίες. Επιπλέον, η διάθεση των απορριμμάτων μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα κατά την εφαρμογή

μεθόδων υπόγειας εξόρυξης που χρησιμοποιούν στην επίχωση δικά τους απορρίμματα που είναι ραδιενεργά(11).

Τελευταίος αλλά όχι λιγότερο σημαντικός από τους ρυπογόνους παράγοντες είναι η παρουσία και η επεξεργασία του νερού που χρησιμοποιείται σε εξορυκτικές εργασίες, το οποίο μπορεί να είναι βιομηχανικό ή υπόγειο νερό χαμηλότερης ποιότητας. Μεταξύ των μεγαλύτερων προκλήσεων που αντιμετωπίζει η βιομηχανία εξόρυξης σπανίων γαιών είναι η ανάγκη ελαχιστοποίησης της απώλειας νερού κατά την επεξεργασία, ενώ ταυτόχρονα να μεγιστοποιείται η ανακύκλωση του νερού. Ως εκ τούτου, είναι μείζονος σημασίας η εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας νερού για την απομάκρυνση των ρύπων πριν ανακυκλωθούν ή απελευθερωθούν στο περιβάλλον(11).

Οι δραστηριότητες εξόρυξης σπανίων γαιών αλλάζουν τις αρχικές περιβαλλοντικές συνθήκες και εκτός από την οικολογική καταστροφή και τη ρύπανση, μπορούν επίσης να αποτελέσουν πηγή προβλημάτων όπως η διάβρωση, η καθίζηση και άλλες γεωλογικές καταστροφές ανάλογα με τον τύπο των εργασιών εξόρυξης. Όταν πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο επιφανειακό περιβάλλον, θα πρέπει να αποφεύγεται οποιαδήποτε μέθοδος εξόρυξης που θα μπορούσε να οδηγήσει σε καθίζηση. Περαιτέρω περιορισμοί γης σε περιοχές υψηλής διατήρησης, εθνικά πάρκα και αστικές περιοχές μπορεί να περιορίσουν το φάσμα των πιθανών μεθόδων εξόρυξης και να απαγορεύσουν ορισμένες εργασίες εξόρυξης και επεξεργασίας για σπάνιες γαίες.

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος είναι ένας βασικός λόγος που προκαλεί το πρόωρο κλείσιμο των ορυχείων. Τα σχέδια κλεισίματος ορυχείων απαιτούνται από τους περισσότερους ρυθμιστικούς φορείς παγκοσμίως, ακόμη και πριν από τη χορήγηση άδειας εξόρυξης και συχνά αποτελούν συστατικό στοιχείο της διαδικασίας εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, το τελικό κόστος για τις κυβερνήσεις και τις κοινότητες θα ήταν καταστροφικό. Συνήθως χρειάζονται δύο έως δέκα χρόνια για να κλείσει ένα ορυχείο, ανάλογα και με τη μέθοδο εξόρυξης, αλλά μπορεί να διαρκέσει ακόμη περισσότερο στην περίπτωση ύπαρξης ραδιενεργών αποβλήτων όταν απαιτείται μακροχρόνια παρακολούθηση ή επεξεργασία του νερού(11).

4.2.4 Γεωγραφικοί Παράγοντες

Περεταίρω αξιολόγηση θα πρέπει να γίνει όμως και σε παράγοντες λόγω γεωγραφικής θέσης του έργου. Οι γεωγραφικοί παράγοντες μπορούν να αλλάξουν το χρονοδιάγραμμα του έργου της εξόρυξης, είτε να αλλάξουν τις μεθόδους εκμετάλλευσης, είτε όμως να είναι και απαγορευτικοί για την συνέχιση του. Από την άλλη δεν είναι εύκολο να διακριθεί σαν κατηγορία γιατί οι παράμετροι της μπορούν να κατανεμηθούν είτε στις κοινωνικοπολιτικές είτε στις περιβαλλοντικές κατηγορίες ανάλογα με τις συνθήκες και τον εκάστοτε μελετητή.

Το έργο όταν βρίσκεται κοντά σε τουριστικές εγκαταστάσεις ή προστατευμένες περιοχές οφείλει να μην δημιουργήσει βλάβες τόσο στις εγκαταστάσεις όσο και στο περιβάλλον κάνοντας απαγορευτική την λειτουργία του όταν δεν μπορεί να τηρήσει τους όρους. Στη Μήλο εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά σε θαλάσσιες περιοχές και οικισμούς χωρίς όμως να επιβαρύνουν το περιβάλλον(66). Επιπλέον εάν βρίσκεται κοντά σε θαλάσσια ή υποθαλάσσια περιοχή μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο εκμετάλλευσης ή ακόμα και το κόστος. Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσονται και οι νομοθετικές διατάξεις για τους αρχαιολογικούς χώρους. Ιδιαίτερη περίπτωση είναι η περιοχή του Λαυρίου που είναι ίσως η μοναδική βιομηχανική πόλη στην Ελλάδα όπου συνυπάρχουν βιομηχανικές εγκαταστάσεις της αρχαιότητας και των νεότερων χρόνων. (Αξιοποίηση παλαιών μεταλλευτικών χώρων στην περιοχή της Λαυρεωτικής)

Οι περιοχές αυτές προστατεύονται από το υπουργείο ενέργειας και περιβάλλοντος της κάθε χώρας και από τις μεταλλευτικές και νομοθετικές ρυθμίσεις της ευρωπαϊκής ένωσης.

Είναι επίσης σημαντικό να αξιολογηθεί η πολιτική σταθερότητα σε γεωγραφικές περιοχές και χώρες όπου βρίσκονται κοιτάσματα σπάνιων γαιών. Η σκοπιμότητα των εξορυκτικών έργων είναι ευαίσθητη σε γεωπολιτικούς κινδύνους και ασταθείς καταστάσεις, ειδικά για εμπορεύματα στρατηγικής σημασίας, στα οποία περιλαμβάνονται οι σπάνιες γαίες. Αμφισβητούμενες περιοχές (γκρίζες ζώνες), όπως κοινές θαλάσσιες περιοχές δυο διαφορετικών χωρών αποτελούν πρόσθετα και δισεπίλυτα προβλήματα για την εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου της περιοχής που μπορούν να κάνουν χρονιά να λυθούν ή να μην λυθούν ποτέ (πχ. θαλάσσια περιοχή μεταξύ Σαμοθράκης-Τιμβρου).

4.2.5 Οικονομικοί Παράγοντες

Η σημασία των φυσικών, τεχνικών, γεωγραφικών και περιβαλλοντικών παραγόντων για την αξιολόγηση του έργου και την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης είναι υψηλή. Ωστόσο, οι εταιρείες εξόρυξης υπάρχουν για να έχουν κέρδος. Οποιοδήποτε κοίτασμα σπάνιων γαιών μπορεί να είναι τεχνικά εξορύξιμο. Το κρίσιμο ερώτημα είναι με ποιο κόστος μπορεί να είναι εφικτή η ανάπτυξή του. Από τη φύση τους, ορισμένες μέθοδοι εξόρυξης έχουν υψηλότερο κόστος από άλλες. Ωστόσο, το κόστος επεξεργασίας μπορεί να είναι απαγορευτικό για τη βιωσιμότητα ενός έργου σπάνιων γαιών. Τελικά, οι περισσότερες αποφάσεις για το εάν και πώς θα τεθεί σε παραγωγή ένα κοίτασμα με σπάνιες γαίες ελέγχεται από οικονομικούς παράγοντες και όχι από τη φύση του κοιτάσματος(9).

Ο υπολογισμός των εξορυκτικών αποθεμάτων και ο ρυθμός παραγωγής είναι δύο σημαντικές οικονομικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής των εξορυκτικών εργασιών (Διάρκεια ζωής του ορυχείου-Length of mine-LOM). Όταν συνδυάζεται με την ποιότητα του μεταλλεύματος και την τιμή των οξειδίων των σπάνιων γαιών, τα αποθέματα μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση της αξίας του κοιτάσματος και των προοπτικών εκμετάλλευσής του. Η τιμή του καλαθιού ΣΓ εξαρτάται από τον τύπο και την αναλογία των μεμονωμένων στοιχείων σπάνιων γαιών που βρίσκονται σε μια κατάθεση. Επιπλέον, η παρουσία πολύτιμων συνπροϊόντων ή παραπροϊόντων μπορεί να βελτιώσει την οικονομική και τη συνολική βιωσιμότητα ενός έργου εξόρυξης σπάνιων γαιών. Θα πρέπει επίσης να συμπεριληφθούν οι εκτιμήσεις της αγοράς που αφορούν τις σπάνιες γαίες. Η αναγνώριση των ιδιαιτεροτήτων της αγοράς σπάνιων γαιών θα βοηθήσει στην επιλογή της μεθόδου εξόρυξης που είναι οικονομικά αποδοτικότερη.

Όλα τα δυνητικά έργα εξόρυξης σπάνιων γαιών σκοπεύουν να επεξεργαστούν σπάνιες γαίες τουλάχιστον μέχρι ένα ορισμένο σημείο όπου παράγεται ένα ενδιάμεσο προϊόν (μεικτό οξείδιο σπάνιων γαιών/ανθρακικό/χλωρίδιο). Στη συνέχεια, το επιχειρηματικό σχέδιο είναι η περαιτέρω επένδυση στην ίδρυση υδρομεταλλουργικής μονάδας για τον διαχωρισμό και τον καθαρισμό των επιμέρους στοιχείων σπάνιων γαιών και την πώλησή τους ως οξείδια σπάνιων γαιών στις αντίστοιχες τιμές τους. Εναλλακτικά, ένα άλλο επιχειρηματικό σχέδιο δεν είναι ο διαχωρισμός των οξειδίων των σπάνιων γαιών, αλλά η προώθηση της πώλησης του μικτού συμπυκνώματος σπάνιων γαιών σε τρίτες εταιρείες επεξεργασίας, ωστόσο, σε μειωμένες τιμές. Κάθε στρατηγική έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, ωστόσο η πιο ορθή οικονομικά έχει να κάνει με τις οριακές συνθήκες αξιολογήσεις.

Μερικές από τις προκλήσεις κατά τον σχεδιασμό της επεξεργασίας σπανίων γαιών σε διαχωρισμένα οξείδια σπανίων γαιών περιλαμβάνουν το υψηλότερο κόστος καθώς και τις μακροσκελείς, αυστηρότερες και προσαρμοσμένες στον πελάτη προδιαγραφές προϊόντων. Από την άλλη πλευρά, η επεξεργασία σπανίων γαιών σε ένα ενδιάμεσο προϊόν μπορεί να μειώσει το σύνολο των αγοραστών σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε ιδιόκτητη που διαθέτει την τεχνογνωσία διαχωρισμού. Επιπλέον, η τιμή πώλησης του μικτού προϊόντος πρέπει να μειωθεί για να αντισταθμιστεί η μη διαχωρισμένη φύση του. Τα προϊόντα στην τελική τους μορφή οξειδίου τιμολογούνται και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τιμής. Ωστόσο, πέντε ΒΣΓ (Ho, Er, Tm, Yb και Lu) έχουν περιορισμένες εξειδικευμένες αγορές που οδηγούν σε ανεπαρκώς περιορισμένες πληροφορίες συναλλαγών και τιμολόγησης. Τελικά, μια πιο συντηρητική προσέγγιση τιμολόγησης που περιλαμβάνει στοιχεία από τον τελικό χρήστη θα συνεπάγεται μικρότερο κίνδυνο κατά την εξισορρόπηση των εσόδων με το κόστος ενός έργου και οποιαδήποτε ταμειακή ροή που προκύπτει από αυτά τα πέντε στοιχεία μπορεί να θεωρηθεί ως πρόσθετο κέρδος.

Οι απαιτήσεις για την εισαγωγή στην παραγωγή πρέπει να ενσωματωθούν σε σχέση με τις παραμέτρους παραγωγής (αποθέματα εξόρυξης και LOM). Το κόστος κεφαλαίου ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο εξόρυξης, το μέγεθος της κατάθεσης, τις απαιτήσεις πρόσβασης και το ποσοστό παραγωγής. Το κόστος του εξοπλισμού, της υποδομής, της προανάπτυξης και της μονάδας επεξεργασίας είναι συνήθως τα κύρια στοιχεία που εμπλέκονται στην έναρξη ενός έργου εξόρυξης σπανίων γαιών. Επιπλέον, πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος για το κλείσιμο του ορυχείου και την αποκατάσταση γης.

Το κόστος της βασικής υποδομής μπορεί να περιλαμβάνει στοιχεία όπως παροχή νερού και ηλεκτρικής ενέργειας, χερσαία ή/και θαλάσσια δίκτυα μεταφορών και εγκαταστάσεις στέγασης των εργαζομένων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ορισμένα κοιτάσματα σπανίων γαιών βρίσκονται σε εξαιρετικά απομακρυσμένες περιοχές, το κόστος υποδομής μπορεί να είναι σημαντικά υψηλό.

Το κόστος λειτουργίας αποτελείται από το καθημερινό κόστος παραγωγής και επεξεργασίας σπάνιων γαιών. Αυτά τα κόστη περιλαμβάνουν μισθούς, αναλώσιμα υλικά όπως εκρηκτικά και χημικά, μεταφορά και ηλεκτρισμό και θεωρούνται μεταβλητά εάν αυξάνονται ή μειώνονται, ανάλογα με την χωρητικότητα που εξορύσσεται ή υφίσταται επεξεργασία. Οι διαφορετικές μέθοδοι εξόρυξης έχουν ποικίλο λειτουργικό κόστος, ανάλογα με την ένταση εργασίας, τις

ανάγκες ισχύος και την παραγωγικότητα. Οι συνθήκες της αγοράς μπορεί να απαιτούν να εξορυχθεί πρώτα μετάλλευμα υψηλότερης ποιότητας και περιεκτικότητας για να μειωθεί ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης της επένδυσης κεφαλαίου και ο επακόλουθος κίνδυνος. Αυτός βέβαια είναι ο σκοπός κάθε εταιρίας για κάθε είδους μεταλλεύματος. Γιατί αυξάνει τις ταμειακές ροές στην αρχή του έργου, κάνει συντομότερη την επιστροφή του κεφαλαίου και κατά συνέπεια αυξάνει το κέρδος και την αξία του έργου (Net present value, NPV). Ωστόσο, δεν είναι πάντα εύκολο για τεχνικούς λόγους να πάρεις πρώτα τα κομμάτια με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα. Εξαρτάται από την δομή του κοιτάσματος, την κατανομή της περιεκτικότητας, την μέθοδο εκμετάλλευσης που θα συντελέσουν στην ακολουθία εξόρυξης (mining sequence). Φυσικά μπορούν να δημιουργηθούν αποθέματα χαμηλότερης περιεκτικότητας που εξορύσσονται και αποτίθενται για να γίνει η μεταλλουργική επεξεργασία τους αργότερα (low ore grade stockpiles). Αυτή η χρηματοοικονομική στρατηγική ενισχύεται από το γεγονός ότι οι περισσότερες μικρές εταιρείες εξόρυξης σπανίων γαιών βασίζουν τις επενδύσεις και τα δάνειά τους στην αύξηση του κεφαλαίου τους. Οριακή οικονομική παράμετρος μπορεί να είναι και η εκμετάλλευση των εναπομείναντων μεταλλευμάτων σπανίων γαιών χαμηλότερης ποιότητας εάν εξορυχθούν επικερδώς.

Ουσιαστικά, ο στόχος είναι να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ της ταχύτερης και της υψηλότερης απόδοσης επένδυσης. Ως εκ τούτου, απαιτείται μια στρατηγική βαθμού αποκοπής, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει όλες τις οικονομικές παραμέτρους του έργου, την επιλογή της μεθόδου εξόρυξης και την αξία του κοιτάσματος.

4.2.6 Κοινωνικοπολιτικοί Παράγοντες

Ο δείκτης «πολιτικής σταθερότητας», ο δείκτης «αντιλήψεις για τη διαφθορά» και το «δυναμικό επίπεδο σύγκρουσης κάθε χώρας» είναι μερικοί **πολιτικοί παράγοντες** που επηρεάζουν στην δημιουργία ενός έργου. Σε πολλές χώρες παγκοσμίως, οι κυβερνήσεις θεσπίζουν νομοθετικά μέσα και περιβαλλοντικούς κανονισμούς που μπορούν να διέπουν αποτελεσματικά τη βιομηχανία σπάνιων γαιών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς έχουν θεσπίσει μια σειρά από οδηγίες και νόμους, αλλά χρήζουν βελτίωσης. Η απόκτηση άδειας εξόρυξης για την έναρξη εργασιών εξόρυξης σπάνιων γαιών μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, ενώ η ίδρυση μονάδας επεξεργασίας σπανίων γαιών είναι δυσκολότερη, μερικές φορές ακόμη και αδύνατη. Αυτό από μόνο του είναι γεγονός που εγείρει

ζητήματα ως προς τη σκοπιμότητα των συνολικών έργων και για τη βιομηχανία εξόρυξης σπάνιων γαιών, καθώς πολλά εργοστάσια επεξεργασίας είναι κατασκευασμένα αρκετά κοντά στις εγκαταστάσεις εξόρυξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο μακροπρόθεσμος χρόνος έγκρισης είναι ένα συχνά αναφερόμενο παράδειγμα γραφειοκρατίας που οδηγεί σε περιττές καθυστερήσεις και μακροχρόνιες γραφειοκρατικές διαδικασίες(11).

Ωστόσο, η έγκριση για την έναρξη δραστηριοτήτων εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών θα πρέπει επίσης να ακολουθείται από **κοινωνική** αποδοχή. Οι εκτεταμένες επιπτώσεις μόλυνσης και οι επιπτώσεις στην υγεία στην Κίνα έχουν ήδη κάνει τις κυβερνήσεις και τους ανθρώπους προκατειλημμένους έναντι οποιασδήποτε ανάπτυξης εξόρυξης και επεξεργασίας σπάνιων γαιών. Ακόμη και όταν ο πραγματικός κίνδυνος μόλυνσης είναι χαμηλός λόγω ασήμαντων συγκεντρώσεων φυσικών εμφανιζόμενων ραδιενεργών υλικών (Naturally occurring radioactive material-NORM) σε κοιτάσματα σπάνιων γαιών ή όταν η πραγματική μόλυνση ελαχιστοποιείται λόγω επαρκών μέτρων ασφαλείας και τεχνικών προφύλαξης, μπορεί να προκληθούν έντονες κοινωνικές αντιδράσεις(11).

Μια άλλη παράμετρος είναι η έλλειψη εμπειρίας στην εξόρυξη και επεξεργασία σπάνιων γαιών εκτός Κίνας. Όταν σταμάτησαν οι εξορυκτικές δραστηριότητες, οι επιπτώσεις δεν ήταν μόνο στην παραγωγή, ήταν και στη τεχνογνωσία όσο και στην έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού. Υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα έμπειρου προσωπικού για εργασία σε ορυχεία σπάνιων γαιών, ειδικά σε υπόγειες επιχειρήσεις εξαιτίας των κοινωνικών επιπτώσεων. Το υπάρχον εργατικό δυναμικό εξόρυξης γενικά γερνάει και η βιομηχανία εξόρυξης αντιμετωπίζει προκλήσεις στην προσέλκυση νέων ανθρώπων στην εργασία, ειδικά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, όπου έχουν ανακαλυφθεί αρκετά κοιτάσματα σπάνιων γαιών. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερους μισθούς για την προσέλκυση ειδικευμένου προσωπικού (Fly In Fly Out – εργατικό δυναμικό FIFO) ή υψηλότερο κόστος για την εκπαίδευση των ντόπιων να εργαστούν στο έργο εξόρυξης. Ο ρόλος της τεχνολογίας μπορεί να βοηθήσει τη βιομηχανία εξόρυξης να αντισταθμίσει αυτήν την επερχόμενη ανεπάρκεια σε εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό, φέρνοντας στην εξίσωση άκρως αυτοματοποιημένες λύσεις. Παρ' όλα αυτά, σε χώρες όπου το κόστος εργασίας είναι χαμηλό και η εκπαίδευση περιορισμένη, οι εργασίες εξόρυξης που απαιτούν μεγάλο εργατικό δυναμικό είναι εφικτές και πιθανώς προτιμότερες(9).

4.3 Ταξινόμηση Κριτηρίων Αξιολόγησης για Εξορύξεις Σπανίων Γαιών

Οι παραπάνω παράμετροι είναι είτε ποσοτικές (Μέγεθος, Σύσταση, κτλ.) είτε ποιοτικές (Εκπαίδευση Προσωπικού, Τεχνογνωσία, κτλ.). Αρκετές από αυτές συνδέονται άμεσα με την επιλογή της πιο σωστής μεθόδου εξόρυξης, ενώ άλλες σχετίζονται επίσης με οικονομικές αποτιμήσεις και κοινωνικοπολιτικές ανησυχίες που μπορούν να επηρεάσουν ένα πιθανό έργο εξόρυξης σπάνιων γαιών συνολικά.

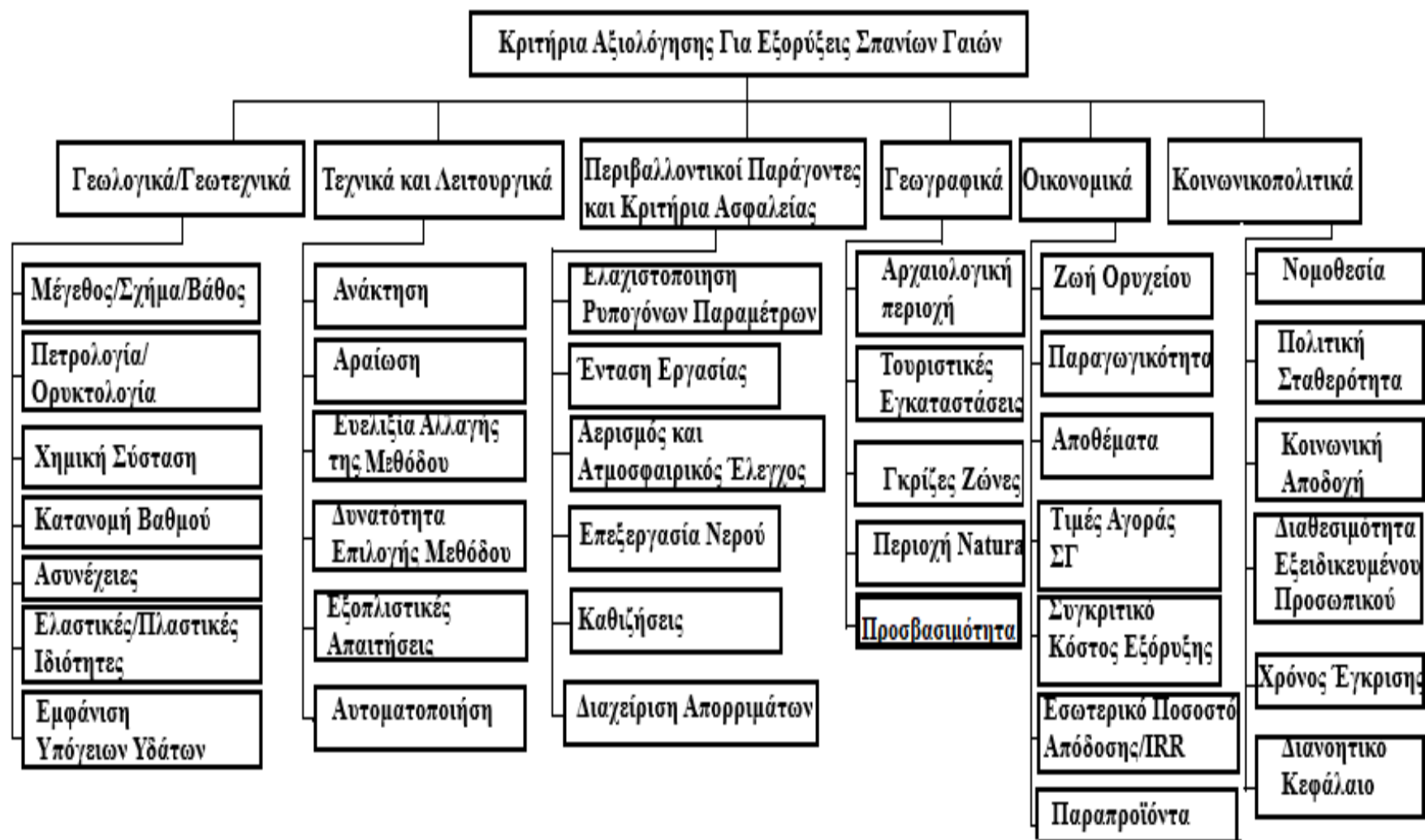
Σε όλες τις μεθοδολογίες αξιολόγησης και τα σχήματα επιλογής μεθόδων εξόρυξης που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα, τα κριτήρια αξιολόγησης δεν ήταν ποτέ τα ίδια ως προς τον συνολικό αριθμό ή τη συνάφεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αρκετές μέθοδοι εξόρυξης εξαλείφονται από τη διαδικασία επιλογής λόγω της ακαταλληλότητάς τους που σχετίζεται με ένα μόνο κριτήριο και πολύ πριν αξιολογηθούν σε σχέση με όλους τους άλλους παράγοντες. Ο Hartman & ο Mutmanský έχουν προτείνει συνολικά 37 κριτήρια ταξινομημένα σε έξι ομάδες για να αναλύσουν λεπτομερώς τα προβλήματα επιλογής των μεθόδων εξόρυξης. Βέβαια πολλές παράμετροι που αφορούν οριακά κριτήρια για τις σπάνιες γαίες δεν περιλαμβάνονται(11).

Η δεντρική ανάλυση που θα δούμε παρακάτω στην διπλωματική είναι βασισμένη σε έναν συνδυασμό από τα κλασσικά κριτήρια αλλά και από πιο πρόσφατους ειδικούς παράγοντες που αφορούν την βιομηχανία των σπάνιων γαιών. Συνολικά τα 37 κριτήρια είναι καταναμημένα σε 6 κατηγορίες σύμφωνα με την συνάφεια τους. (Εικόνα 13)

Η κάθε παράμετρος θα εξετάζεται ξεχωριστά και ανάλογα με την δυσκολία εφικτότητας (**ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 0**, **ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 1**, **ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 2**, και **ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 3**) (Πίνακας 9). Ωστόσο, ανάλογα με τις ιδιότητες των κοιτασμάτων και τις συνθήκες του εξεταζόμενου έργου εξόρυξης σπανίων γαιών, δεν πρέπει απαραίτητα να αξιολογηθούν όλα τα κριτήρια, αλλά αυτά που εντοπίσαμε ως πιο κρίσιμα. Στα έργα που αφορούν την Ελλάδα διαπιστώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό, η έρευνα να βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Τα συνολικά έργα που θα εξετάσουμε είναι δύο στην Βόρεια Ευρώπη και δύο στην Ελλάδα.

Πίνακας 9 : Δυσκολίας εφικτότητας κριτηρίων.

ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 0	Το κριτήριο είναι εφικτό.
ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 1	Το κριτήριο έχει μεγάλη δυνητική εφικτότητα στο άμεσο μέλλον/ χαμηλό ρίσκο.
ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 2	Το κριτήριο έχει δυνητική εφικτότητα ωστόσο η έρευνα είναι σε πρώιμο στάδιο/ αρκετό ρίσκο .
ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΕΦΙΚΤΟΤΗΤΑΣ 3	Το κριτήριο έχει δυνητική εφικτότητα μόνο μετά από ακραίες αλλαγές/ μεγάλο ρίσκο



Εικόνα 13: Κατανομή κριτηρίων αξιολόγησης ανάλογα με την κατηγορία τους.

5. Δυνατότητες εκμετάλλευσης γεωλογικών σχηματισμών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες στον Ελλαδικό και Ευρωπαϊκό χώρο

5.1 Μεθοδολογία

Για μια σωστά τεκμηριωμένη αξιολόγηση έργου εκμετάλλευσης σπάνιων γαιών πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλές παράμετροι. Ο καθορισμός, τόσων παραμέτρων εισόδου και κριτηρίων ειδικά για τη βιομηχανία σπάνιων γαιών είναι ένα πολυσύνθετο πρόβλημα. Σε κάποιο βαθμό, πολλές πτυχές αξιολόγησης αλληλεπικαλύπτονται, και επομένως απαιτείται μια βέλτιστη ισορροπία που παράγει το καλύτερο δυνατό τεχνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα.

Παρακάτω παρουσιάζονται 4 διαφορετικές ανάστροφες δενδρικές αναλύσεις, βάσει κάποιων κριτηρίων, ώστε να δοθεί η προοπτική για μελέτη σκοπιμότητας για το αντίστοιχο έργο. Η αξιολόγηση των κριτηρίων γίνεται μετά από επεξεργασία των δεδομένων, από πηγές από το google scholar χρησιμοποιώντας λέξεις κλειδιά αλλά και σε σύγκριση με άλλες αντίστοιχες εκμεταλλεύσεις που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία.

5.2 Norra Kärr

Η αξιολόγηση του Norra Kärr βασίζεται στην προκαταρκτική οικονομική μελέτη του '21 της εταιρίας LEM(Leading Edge Materials) και σε παλιότερες έρευνες.

Γεωγραφικά η τοποθεσία του Norra Kärr βρίσκεται στη νοτιοκεντρική Σουηδία, περίπου 1,5 χλμ. από την ανατολική όχθη της λίμνης Vattern, με τη λίμνη και το κοίτασμα να χωρίζονται από τον διεθνή σουηδικό αυτοκινητόδρομο E4. Βρίσκεται κοντά και στις δύο σουηδικές ακτές, περίπου 240 χλμ. νοτιοδυτικά της Στοκχόλμης και 160 χλμ. ανατολικά του Γκέτεμποργκ. Ο πλησιέστερος αστικός οικισμός είναι η Granna, 11 χλμ. νότια από σφραγισμένο δρόμο. Επί του παρόντος, η τοποθεσία είναι ανεκμετάλλευτη εντός της περιμέτρου και η περιοχή εξακολουθεί να διατηρεί φυσική βλάστηση, δασικές φυτείες, καλλιεργούμενες γεωργικές εκτάσεις και αγροικίες. Για την εταιρία, το ότι βρίσκεται κοντά σε λίμνη είναι πολύ σημαντικό γιατί μπορεί να μειώσει την παροχή νερού από εξωτερικές πηγές ρίχνοντας το κόστος(67).

Γεωλογικά, το Norra Kärr είναι ένα υπεραλκαλικό πυριγενές σύμπλεγμα από νεφελινικό συνενίτη. Το ορυκτό που εμφανίζει σπάνιες γαίες είναι ο ευδιαλύτης (ένα σύνθετο πυριτικό ζιρκόνιο). Ο ευδιαλύτης είναι σχετικά πλούσιος σε ΣΓ και περιέχει μεγάλη αναλογία βαρέων στοιχείων σπάνιων γαιών. Το κοίτασμα έχει κλίση 35°- 40° με μήκος κατά προσέγγιση 1.300 μ. και πλάτος 450 μ. ενώ η εκμετάλλευση γίνεται από την επιφάνεια και φτάνει μέχρι τα 395 μ. βάθος. (Εικόνα 14)



Εικόνα 14: Γραφική απεικόνιση του επιτόπιου ανοιχτού λάκκου του Norra Kärr, της εγκατάστασης απορριμμάτων βράχων και της μονάδας φυσικού εμπλουτισμού σε σύγκριση με την Προκαταρκτική Μελέτη Σκοπιμότητας του 2015 (με κόκκινο χρώμα βλέπουμε το φράγμα απορριμμάτων)(68)

Τα συνολικά οξείδια σπάνιων γαιών φτάνουν 5341 τόνους, εκ των οποίων το 20% είναι μαγνητικά οξείδια (Nd_2O_3 :578 τόνοι, Pr_2O_3 : 143 τόνοι, Dy_2O_3 :248 τόνοι, Tb_2O_3 :36 τόνοι) και 54% είναι ΟΒΣΓ (Y_2O_3 : 1805 τόνοι). Γεωλογικά προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό το ορυχείο που βρίσκεται στο Lonozero της δυτικής Ρωσίας(69) και εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας σε ΟΒΣΓ γίνεται ιδιαίτερα ελκυστικό(68).

Σύμφωνα με μελέτη του '21 από τις 15 αξιολογήσεις των μεθόδων εκμετάλλευσης για το έργο, οι τρεις με την υψηλότερη βαθμολογία ήταν της επιφανειακής εκμετάλλευσης στις υπαίθριες, ενώ των υπογείων εκμεταλλεύσεων οι καταλληλότερες είναι των διαδοχικών οροφών με κενά μέτωπα και της κοπής και λιθογόμωσης.(54) Αυτό σημαίνει ότι ενώ η εκμετάλλευση θα ξεκινήσει επιφανειακά, εξαιτίας φυσικών εμποδίων το έργο θα συνεχίσει με κάποια άλλη μέθοδο υπόγειας εκμετάλλευσης. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε χαμηλή δυνατότητα επιλογής

εξόρυξης όπως και επιπλέον περιβαλλοντική επιβάρυνση εξαιτίας των υπογείων μεθόδων. Η συνολική ανάκτηση των οξειδίων σπάνιων γαιών είναι 84,1% ενώ χαμηλότερη ανάκτηση έχουμε στα οξείδια του ζirkονίου και του υδροφθορίου είναι 48.6%(68).

Βάσει των αξιολογήσεων της SRK(68) (αγγλική εταιρία που εξειδικεύεται σε γεωτεχνικά και περιβαλλοντικά έργα), η εξόρυξη προγραμματίζεται να σχεδιαστεί σε 26 χρόνια ζωής του ορυχείου σε σχέση με την ΠΜΣ (Προκαταρκτική Μελέτη Σκοπιμότητας) του '15 που ήταν σχεδιασμένο στα 20 χρόνια. Στην ίδια μελέτη προβλέπονται συσσωρευμένα κέρδη της εταιρίας στα 9,962 εκατομμύρια δολάρια αλλά με ένα σχετικά υψηλό κόστος, που είναι στα 53 δολάρια ανά κιλό της μέσης τιμής του καλαθιού των σπάνιων γαιών, κάτι που δεν αντιστοιχεί με τις τιμές του κεφαλαίου 2, εφόσον οι τιμές των οξειδίων αλλάζουν συνεχώς και μπορεί να υπάρξει σχετική απόκλιση (Πίνακας 10). Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) μετά την φορολογία αγγίζει τα 762 εκατομμύρια δολάρια με προεξοφλητικό επιτόκιο στο 10% ενώ οι αρχικές κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) είναι στα 487 εκατομμύρια δολάρια. Ο βαθμός αποκοπής υπολογίστηκε στα 150 δολάρια ανά τόνο. Ένα άλλο γεγονός που επηρεάζει την λειτουργία του είναι ότι βρίσκεται στην Σουηδία η οποία έχει ισχυρή οικονομία και τα ποσοστά απόδοσης χωρίς κίνδυνο είναι πολύ χαμηλά. Ως εκ τούτου, το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι σχεδόν ο απολογισμός με βάση τους υπολογισμούς των δικλίδων ασφαλείας. Το ίδιο έργο σε χώρα με λιγότερο ισχυρή οικονομία, θα είχε προεξοφλητικό επιτόκιο ακόμη υψηλότερο, αντανακλώντας υψηλότερους κινδύνους(54).

Πίνακας 10: Μέσες τιμές των οξειδίων των σπάνιων γαιών καθ' όλη διάρκεια της ζωής του ορυχείου βάση της SRK(68).

ΟΣΓ	Ce	Dy	Eu	Gd	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Y
\$/kg	2,25	486,33	54,2	39,66	3,19	800	103,36	108,38	2,71	1215,8	6,75

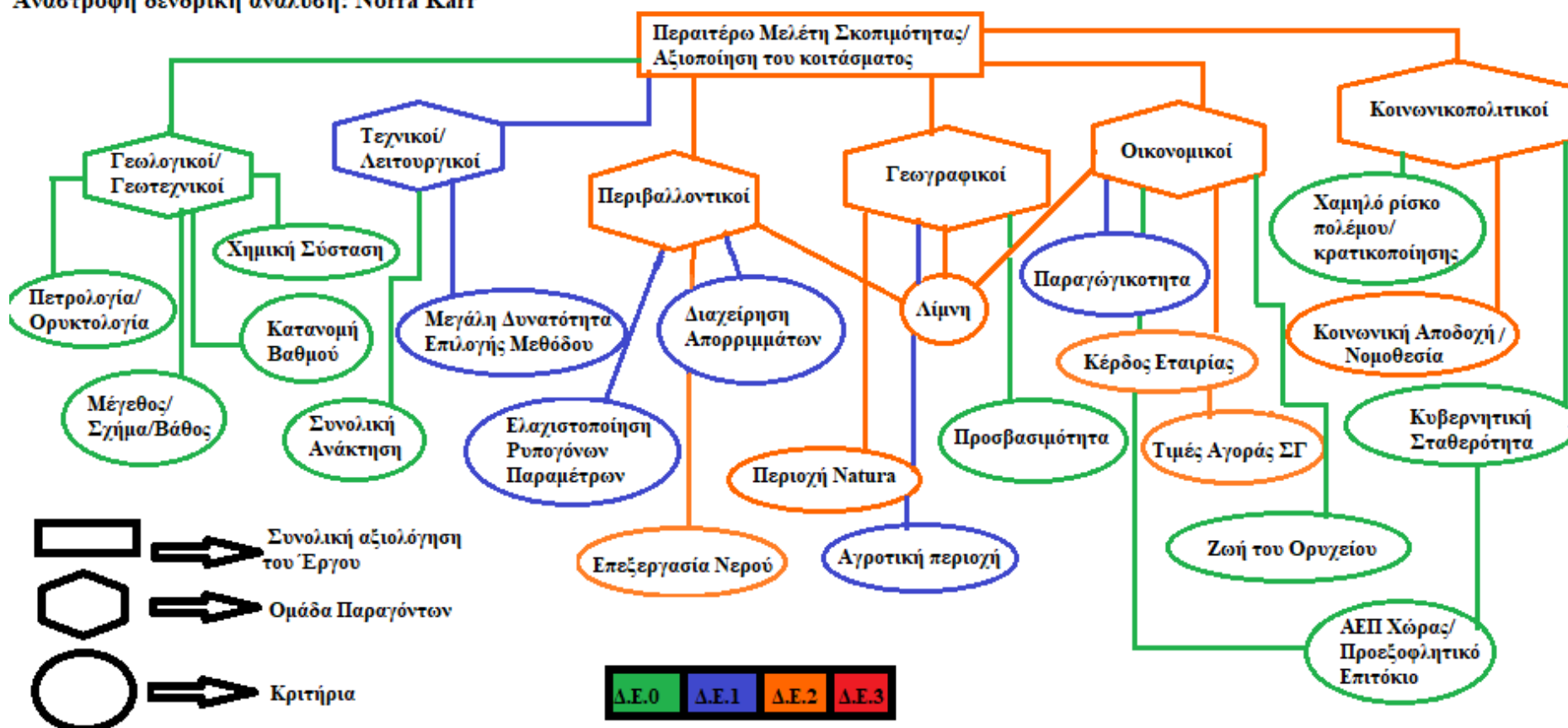
Περιβαλλοντικά παίρνουμε υπόψιν ότι το Norra Karr είναι κοντά σε μεγάλη έκταση περιοχής Natura η οποία προστατεύεται από τη νομοθεσία της Ε.Ε. Το προτεινόμενο ορυχείο βρίσκεται επίσης κοντά σε λίμνη που παρέχει γλυκό νερό καλύπτοντας 250.000 κατοίκους. Αναμφίβολα

τα κοινωνικά επιχειρήματα και οι διαμαρτυρίες κατά της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος Norra Kärr ήταν μαζικές. Πολλές περιβαλλοντικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένης της Save the Baltic, έχουν εκφράσει τις ανησυχίες τους για τις επιπτώσεις που θα μπορούσε να έχει το ορυχείο στη λίμνη Vattern, ειδικά λόγω του θειικού οξέος που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των ορυκτών σπάνιων γαιών από άλλα ορυκτά.(53) Το αποτέλεσμα αυτής της μαζικής διαμαρτυρίας ήταν η απόφαση του δικαστηρίου της Σουηδίας το 2016 να διακόψει την άδεια. Η επίσημη αιτιολογία που δόθηκε από το δικαστήριο ήταν ότι η Leading Edge Materials δεν είχε περιγράψει τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εγκαταστάσεων όπως τα φράγματα απορριμμάτων. Η εταιρία πρότεινε λύσεις για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως μετά των φυσικό διαχωρισμό να αποστέλλονται οι ροές υλικών είτε ως προϊόντα είτε ως συμπύκνωμα για περαιτέρω επεξεργασία σε άλλες τοποθεσίες και να υπάρχει μόνο μια ροή υλικών στην περιοχή. Το συμπύκνωμα που περιέχει σπάνιες γαίες, ζirkόνιο και νιόβιο θα μεταφέρεται σε αποκλειστική τοποθεσία εκτός του εργοταξίου για χημική επεξεργασία και περαιτέρω ανάκτηση. Ο συνδυασμός των παραπάνω, έχει ως αποτέλεσμα ένα ενιαίο ρεύμα αποβλήτων στη θέση του Norra Kärr. Το ορυκτό αιγιδίνης το οποίο περιέχεται στα απόβλητα, μπορεί να στοιβάζεται επί ξηρού σε μια επενδυμένη δέσμευση μαζί με τα απόβλητα πετρώματα από την εξόρυξη, εξαλείφοντας την ανάγκη για μια εγκατάσταση αποθήκευσης υγρών απορριμμάτων. Αυτός ο νέος σχεδιασμός μειώνει ουσιαστικά τη χρήση της γης του έργου κατά περίπου 80% και έχει ως αποτέλεσμα να μην απαιτούνται φράγματα απορρόφησης χημικών διεργασιών στην περιοχή(70). Αυτές οι αλλαγές μειώνουν σημαντικά το προφίλ περιβαλλοντικού κινδύνου του έργου σύμφωνα με την εταιρία. Βέβαια από την άλλη το κοιτάσμα του Norra Kärr έχει το πλεονέκτημα ότι οι μέσες συγκεντρώσεις ουρανίου (U:11,4 ppm) και θορίου (Th:10,9 ppm) με βάση 9987 δείγματα, δείχνουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές σε σύγκριση με άλλα κοιτάσματα σπάνιων γαιών όπως του Kvanefjeld.

Τελευταίος, αλλά εξίσου σημαντικός είναι ο πολιτικός παράγοντας, επειδή όμως η Σουηδία έχει δείξει κυβερνητική σταθερότητα (κυβερνά από το 1932 το Σοσιαλδημοκρατικό Κόμμα της Σουηδίας μέχρι το καλοκαίρι του 2022) και ο τελευταίος πόλεμος που πήρε μέρος ήταν πριν δύο αιώνες, ελαχιστοποιεί την πιθανότητα επιρροής του έργου, παρόλο που οι σημερινές εξελίξεις ανεβάζουν σχετικά τον αντίστοιχο δείκτη. Εξαιτίας αυτής της σταθερότητας όμως ελαχιστοποιείται και η πιθανότητα κρατικοποίησης.

Συμπερασματικά, επειδή το έργο του Norra Kärr βρίσκεται 1,5 χιλιόμετρο από την όχθη της δεύτερης μεγαλύτερης λίμνης της Σουηδίας, του Vättern, η οποία είναι πηγή πόσιμου νερού για 250.000 άτομα, πολίτες, οργανώσεις και πολιτικοί έχουν εκφράσει ανησυχίες για πιθανή εξόρυξη γιατί θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά το τοπικό περιβάλλον και, τελικά, την ποιότητα του νερού στη λίμνη. Αν και μια παλιότερες έρευνες έδειξαν ότι λιγότεροι από τους μισούς ντόπιους ήταν άμεσα αντίθετοι με το έργο, υπάρχει σημαντική αντίσταση και διαμαρτυρία από μια ενδιαφερόμενη τοπική κοινότητα. Αυτή είναι μια κοινότητα που αισθάνεται μεγάλη πίεση από την Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία πιστεύει ότι ένα ορυχείο στο Norra Kärr θα ήταν μια ουσιαστική συμβολή στην εξασφάλιση πρωτογενούς προμήθειας ΣΓ. Επιπλέον, η αβεβαιότητα για την παραγωγή των τελικών προϊόντων και οι χαμηλές τιμές των ΣΓ έχουν εξίσου υψηλές βαθμολογίες κινδύνου. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη κι αν δοθεί η κοινωνική άδεια λειτουργίας για το έργο του Norra Kärr, μάλλον θα ήταν οικονομικά ανέφικτο. Ως εκ τούτου, λόγω αυτών των οικονομικών περιβαλλοντολογικών και κοινωνικών κριτηρίων η συνολική αξιολόγηση όπως θα δούμε και από το ανάστροφο δέντρο που ακολουθεί είναι Δ.Ε.=2. (Εικόνα 14)

Ανάστροφη δενδρική ανάλυση: Norra Kärr



Εικόνα 14 :Ανάστροφη δενδρική ανάλυση για την περιοχή Norra Kärr.

5.2 Kvanefjeld

Το δεύτερο ευρωπαϊκό έργο με σπάνιες γαίες που εξετάζεται είναι στην περιοχή του Kvanefjeld στην Γροιλανδία, που το διαχειρίζεται η Greenland Minerals της οποίας ένας συνιδιοκτήτης είναι το κινεζικό γκρουπ Shenghe Resources που κατέχει το 12,5%.

Το έργο περιλαμβάνει τρία συνδεδεμένα κοιτάσματα με ΣΓ, τα οποία είναι το Kvanefjeld , η Zone 3 και το Sørensen. Το Kvanefjeld βρίσκεται στην νότια Γροιλανδία και δίπλα στην πόλη Narsaq και άρχισε να έχει ενδιαφέρον μετά την ανακάλυψη ουράνιου και θορίου το 1956. Παρόλο που η Γροιλανδία είναι ένα νησί που το 80% αποτελείται από πάγους, η συγκεκριμένη περιοχή έχει πρόσβαση στην ναυτιλία όλο τον χρόνο(71) (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Χάρτης των κοιτασμάτων ΣΓ στην περιοχή του Kvanefjeld.

Το οροπέδιο Kvanefjeld έχει διαστάσεις περίπου στα 2100 μ μήκος και 900 μ πλάτος και περιλαμβάνει το δυτικότερο τμήμα της πρώτης ζώνης λουζαβριτών μήκους 4500 μ που εκτείνεται νοτιοδυτικά από τους πρόποδες του βουνού Ilimmaasaq (αλκαλικό σύμπλεγμα). Η περιοχή αποτελείται κυρίως από λουζαβρίτες (lujavrites) που φτάνουν περίπου τα 350 μ βάθος,

στο δυτικό τμήμα τους εμφανίζεται στο σιενίτη, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος υπάρχει και σε *naujaite* που φτάνει και τα 1500 μ. Οι παρακείμενοι βράχοι είναι λάβες, συσσωματώματα και ψαμμίτες που αναμιγνύονται με φύλλα γάβρου και τραχύτη. Αυτοί οι βράχοι σχηματίζουν τις ανερχόμενες ΒΑ-ΝΔ κορυφογραμμές που κυριαρχούν στην τοπογραφία του νότιου τμήματος του οροπεδίου και χαρακτηρίζουν πολλούς από τους πυρήνες γεωτρήσεων του, αλλά παίζουν δευτερεύοντα ρόλο στο βορειότερο τμήμα του οροπεδίου στην περιοχή κάτω από το Steenstrup Fjeld που κυριαρχούνται από λουζαβρίτες. Ενώ τα συνολικά ΟΣΓ είναι 11,14 εκατομμύρια τόνοι βάσει των μελετών που έχουν γίνει, μόνο το 1,72 έχει μετρηθεί χωρίς όμως να μας εμποδίζει να το κατατάξουμε ίσως στο μεγαλύτερο κοίτασμα ΣΓ της Ευρώπης όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3. Τα ΟΕΣΓ αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος φτάνοντας τους 9,7 εκατομμύρια τόνους ενώ υπάρχουν μόλις 1,3 εκατομμύρια τόνοι ΟΒΣΓ. Η περιοχή είναι πλούσια σε νεοδύμιο, πρασεοδύμιο, ευρώπιο, δυσπρόσιο, τέρβιο, ύτριο και ουράνιο. Επίσης η εκμετάλλευση μπορεί να παράγει οξείδια του δημήτριου, προϊόντα λανθανίου, ψευδάργυρο και αργυραδάμαντα, κάτι που θα βοηθήσει στην εξισορρόπηση της οικονομικής αβεβαιότητας(72).

Τεχνικές μελέτες για το πώς θα πραγματοποιηθεί η εξόρυξη και ποιος θα είναι ο οικονομικότερος τρόπος δεν έχουν ολοκληρωθεί, αλλά σίγουρα θα υλοποιηθεί υπαίθρια εξόρυξη εφόσον οι ποιοτικότερες ΣΓ, το ουράνιο και ο ψευδάργυρος εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια ενώ μειώνονται στο βάθος. Το προτεινόμενο έργο φέρεται να περιλαμβάνει την κατασκευή και λειτουργία ανοιχτού ορυχείου (ΣΓ και ουράνιο), εργοστάσιο εμπλουτισμού, λιμάνι, εγκαταστάσεις απορριμμάτων, οδικά έργα, μια δεξαμενή, μονάδα παραγωγής ενέργειας, και διαθεσιμότητα και υποδομές χώρων. Το μέταλλευμα που εξορύσσεται από τον ανοιχτό λάκκο θα μεταφέρεται με φορτηγά στον συμπυκνωτή, μετά στη σύνθλιψη, ενώ η επίπλευση θα χρησιμοποιείται ως μέθοδος εμπλουτισμού για την συμπύκνωση των ορυκτών αξίας. Η ανάκτηση του διωλισταρίου θα φτάνει τα 90% σε U και 70 % σε ΣΓ(73).

Είναι σχεδιασμένο ως ένα ανοιχτό έργο 37 ετών με ρυθμό παραγωγής ορυχείου στα 3 εκατομμύρια τόνους μεταλλεύματος τον χρόνο. Το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται συνολικά στα 1361 εκατομμύρια δολάρια \pm 15% με 25% συμπεριλαμβανομένου και του λειτουργικού κόστους που ανέρχεται στα 237,3 εκατομμύρια δολάρια τον χρόνο. Το υπολογισμένο κόστος λειτουργίας όμως, ήταν κατά 9,94% μεγαλύτερο από το πραγματικό και έτσι είναι πιθανό να το έχουν υπερεκτιμήσει. Ο βαθμός αποκοπής του U_3O_8 είναι 0,015% και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των πόρων, καθώς υπάρχει μεγαλύτερη κάλυψη των αναλύσεων για ουράνιο, οπότε και αξιοπιστία, και ήταν ο δείκτης που χρησιμοποιούνταν στην φασματική ανάλυση από

την Greenland Minerals and Energy Ltd το 2016(73). Σύμφωνα με τον αναλυτή αγοράς Adamas Intelligence(55) και της έκθεσης της εταιρείας το 2015 η προβλεπόμενη τιμή καλαθιού του Kvanefjeld για το 2019 ήταν στα 31,2 \$ ανά κιλό σε οξείδια σπάνιων γαιών και φτάνει στα 78,6 \$ ανά κιλό λόγω της μείωσης της περιεκτικότητας του λανθανίου και του δημητρίου όσο προχωράει η εκμετάλλευση.

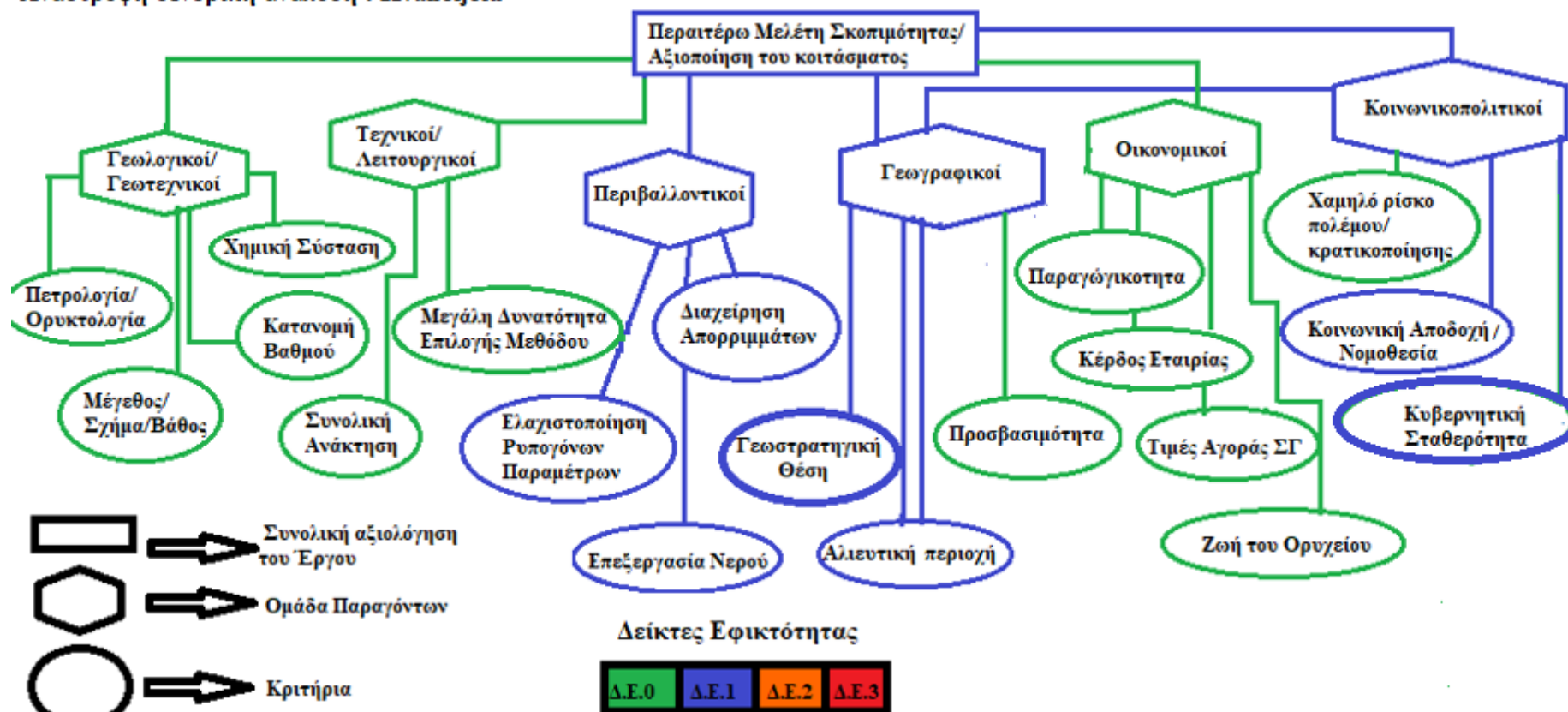
Εξαιτίας ότι το Kvanefjeld είναι δίπλα στην πόλη Narsaq δημιούργησε περιβαλλοντικές ανησυχίες στους ντόπιους, λόγω της εξαγωγής ουρανίου που είχε απαγορευτεί από το 1988, αλλά χαλάρωσε το μέτρο το 2010. Σύμφωνα με τους επενδυτές της εταιρείας, η αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων της Greenland Minerals, η αξιολόγηση κοινωνικών επιπτώσεων και η μελέτη για την ασφάλεια στη θάλασσα, έγιναν όλα αποδεκτά από την προηγούμενη κυβέρνηση της Γροιλανδίας. Από την άλλη η κλιματική αλλαγή είναι ένα εκθετικό πρόβλημα που ανησυχεί έντονα την χώρα, εφόσον οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν στο διπλάσιο από το παγκόσμιο μέσο ορό και η περιοχή έχει σημειώσει ρεκόρ μειώσεων του συνολικού πάγου, ενώ συναντάει ισχυρότερες και με μεγαλύτερη συχνότητα ακραίες καιρικές συνθήκες(47,71,74,75).

Η Γροιλανδία θεωρείται νησί με σημαντική στρατηγική θέση, όπως συνάγεται από το ενδιαφέρον των ΗΠΑ για την αγορά της μετά τις δηλώσεις του D.Trump το 2019. Οι Κινέζοι γνωρίζουν ότι θα είναι ένας σημαντικός εταίρος στην αγορά σπάνιων γαιών λόγω των πλουσίων κοιτασμάτων(76). Παρόλο που μέχρι και την προηγούμενη δεκαετία η προοπτική να λειτουργήσει η εκμετάλλευση της περιοχής εξελισσόταν θετικά, πολλοί κοινωνικοπολιτικοί λόγοι φτάσανε το έργο σε αδιέξοδο. Σημαντικό ρόλο έπαιξε το ινστιτούτο Fraser στον Καναδά που κατάτασσε το έργο σε χαμηλή βαθμολογία σε σχέση με την αβεβαιότητα των επιπτώσεων στο περιβάλλον, στην ποιότητα των κοινωνικοοικονομικών συμφωνιών, σε κανονισμούς εργασίας και άλλα, με τον δείκτη να ανεβαίνει το 2020 σε σχέση με το 2019 χωρίς όμως να είναι στο επιτρεπτό όριο. Οι υποστηρικτές του ορυχείου, που αποτελούν μόλις το 29% του πληθυσμού σύμφωνα με μια έρευνα του 2021, πιστεύουν ότι θα αποφέρει εκατομμύρια δολάρια σε έσοδα και δημιουργία εκατοντάδων θέσεων εργασίας, δυο σημαντικούς παράγοντες για την οικονομική αυτονομία της Γροιλανδίας. Όλα αυτά βέβαια πάγωσαν, ειδικά μετά την εκλογή του αριστερού κόμματος IA τον Απρίλιο του 2021 που αντιτίθεται στους Κινέζους επενδυτές. Η κυβέρνηση υποστηρίζει ότι η εξόρυξη σπάνιων γαιών στο Kvanefjeld συνοδεύεται από εκχύλισμα ραδιενεργού ουρανίου ως παραπροϊόντος και η διαδικασία διαχωρισμού την κάνει εξαιρετικά ρυπογόνο. Ενώ έχει παγώσει και τις αναζητήσεις πετρελαίων εξαιτίας της

κλιματικής αλλαγής, αυτό δείχνει μια ευαισθητοποίηση της νέας κυβέρνησης για λογαριασμό των δραστηριοτήτων των πολιτών και του περιβάλλοντος σε σχέση με τα οικονομικά οφέλη, χωρίς όμως να είναι αρνητική στις περαιτέρω έρευνες σύμφωνα με την έγκριση που πήρε τον Δεκέμβριο του 2022(75).

Παρά τις προκλήσεις που περιγράφονται παραπάνω, το έργο στο Kvanefjeld στο συγκρότημα Pímaussaq δείχνει ότι διαθέτει μεγάλα κοιτάσματα ΣΓ. Η ζήτηση για ΣΓ θα αυξηθεί με την αυξανόμενη ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας. Το άνοιγμα νέων πεδίων εξόρυξης ανοίγει ζητήματα τόσο στην περιβαλλοντική ρύπανση, όσο στην υγεία των κατοίκων, στην πολιτιστική κληρονομιά της περιοχής αλλά εμφανίζει και πολιτικά ζητήματα. Η ΕΕ αύξησε την έρευνα για τις καταθέσεις ΣΓ αλλά έχουν βρει μόνο μερικά κοιτάσματα με ΣΟΣΓ σημαντικού μεγέθους δίπλα στο συγκρότημα Pímaussaq. Η αξιολόγηση για το Kvanefjeld είναι Δ.Ε=1 και δείχνει ότι είναι αυτή που είναι πιο κοντά από όλες για μελλοντική αξιοποίηση του κοιτάσματος εφόσον αναθεωρηθούν οι ισχύουσες πολιτικές απόψεις και βελτιστοποιηθούν οι μέθοδοι εκμετάλλευσης ΣΓ ως προς το περιβάλλον.(Εικόνα 16)

Ανάστροφη δενδρική ανάλυση : Κvanefjeld

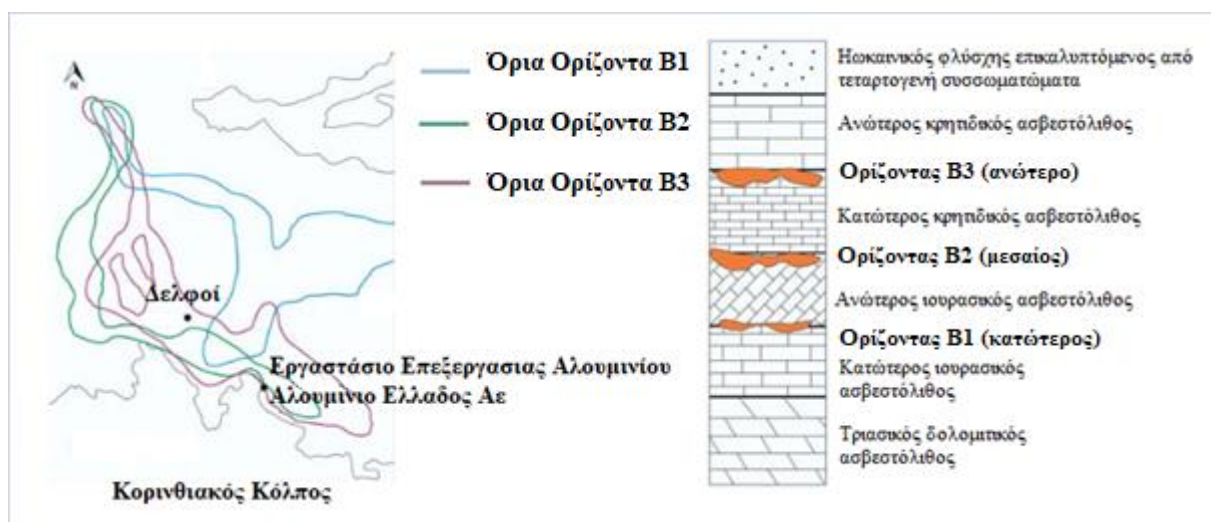


Εικόνα 16:Ανάστροφη δενδρική ανάλυση για την περιοχή Κvanefjeld

5.3 Παρνασσός-Γκιώνα

Η Ελλάδα είναι η 12η μεγαλύτερη παραγωγός ορυχείων βωξίτη παγκοσμίως και η μεγαλύτερη στην ΕΕ με ετήσια παραγωγή 1800 χιλιάδων ξηρών τόνων το 2017. Στις μέρες μας, τα ελληνικά αποθέματα βωξίτη, τα οποία θα μπορούσαν να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα, εκτιμάται ότι είναι περίπου 250.000 χιλιάδες ξηροί τόνοι και βρίσκονται στην περιοχή Παρνασσού-Γκιώνας. Τα περισσότερα από τα ακατέργαστα μεταλλεύματα τα επεξεργάζεται το «Αλουμίνιο Ελλάδος Α.Ε.» και εκεί έχουν βρεθεί εμφανίσεις σπάνιων γαιών είτε από την ερυθρά ιλύ (αποτελεί το παραπροϊόν της επεξεργασίας του βωξίτη για την παραγωγή αλουμινίου μέσω της διεργασίας Bayer) , είτε στους καρστικούς τύπους βωξίτη της περιοχής(62).

Η περιοχή αποτελείται από 3 ορίζοντες βωξίτη, που πήραν τις ονομασίες B1-B3 από το γηραιότερο προς το νεότερο και σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της ανώτερης ιουρασικής έως την μέση κρητιδική περίοδο (Εικόνα17). Το πλουσιότερο κοίτασμα εμφανίζεται στον ορίζοντα B3 που είναι πλευρικά εκτεταμένο ως συνεχές στρώμα πάχους μεταξύ ενός και δέκα μέτρων, ενώ ο ορίζοντας B1 δεν είναι ακόμα εξερευνημένος λόγω του μεγάλου βάθους του(77).



Εικόνα 17: Χάρτης των οριζόντων B1,B2,B3 της περιοχής Παρνασσού-Γκιώνας(78).

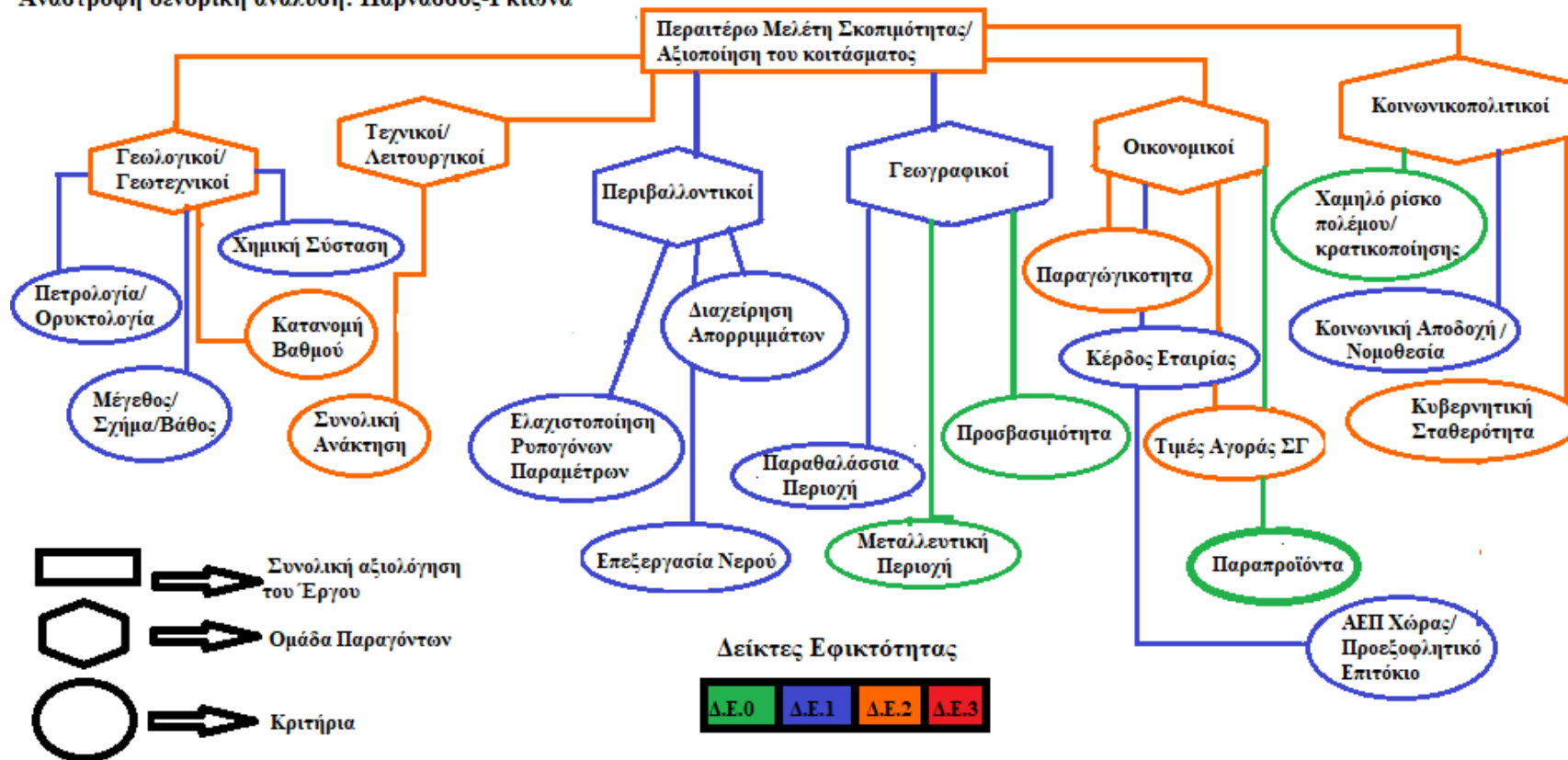
Στην ορυκτολογία των βωξιτών της περιοχής B3 κυριαρχεί το οξείδιο του αργιλίου βοϊμίτης $[(\gamma\text{-AlO}(\text{OH}))]$ και διασποράς $[(\alpha\text{-AlO}(\text{OH}))]$, τα οξείδια του σιδήρου αιματίτης (Fe_2O_3) και ο γαιθίτης $[\text{FeO}(\text{OH})]$, οξείδιο του τιτανίου (TiO_2), και δευτερογενή ορυκτά όπως ο καολινίτης $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ μεταξύ και άλλων. Ο βωξίτης στην περιοχή περιέχει έως και 5% καολινίτη, καθώς και μικρότερες ποσότητες άλλων ορυκτών αργίλου όπως ο ιλίτης και ο χαμοσίτης. Τα ελληνικά κοιτάσματα βωξίτη περιέχουν κατά μέσο όρο περίπου 400-500 ppm σπανίων γαιών. Τα ορυκτά που φέρουν σπάνιες γαίες και βρίσκονται στον βωξίτη Παρνασσού-Γκιώνα είναι φθοροανθρακικά ορυκτά ΕΣΓ της ομάδας μπαστνασίτη $((\text{Ce},\text{La})\text{CO}_3\text{F})$ και παρασίτη $(\text{Ca}(\text{Ce},\text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2)$. Από την άλλη πλευρά, τα επιβλαβή ορυκτά με σπάνιες γαίες είναι φωσφορικός ραβδοφάνης $((\text{Ce},\text{La})\text{PO}_4(\text{H}_2\text{O}))$ και ο φλωρενσίτης $(\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6)$ και τα Υ-φωσφορικά τσουρκίτη $(\text{YPO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}))$ και ξενότιμο (YPO_4). Αν και ο εμπλουτισμός ανά κατάβαση οδηγεί περιστασιακά σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σπανίων γαιών κοντά στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο, δεν αποτελεί τυπικό χαρακτηριστικό κάθε κοιτάσματος βωξίτη. Οι ΣΓ που εμφανίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό είναι Ce, La, Nd και το Y(77).

Η περιοχή έχει ήδη εν ενεργεία υπόγειες εκμεταλλεύσεις για την εκμετάλλευση βωξίτη με την μέθοδο θαλάμων και στύλων ή με την μέθοδο διαδοχικών ορόφων με κατακρήμνιση οροφής. Το απόβλητο που προκύπτει, η ερυθρά ιλύς, εμφανίζει διπλάσιες συγκεντρώσεις έως και 1000 ppm σε σχέση με τον βιομηχανικό βωξίτη. Η συλλογή της ερυθράς ιλύος ξεκίνησε το 2009 και μέχρι το τέλος του 2015 με το συνολικό βάρος να έχει φτάσει τους 5 εκ.τ. (700,000 τ./έτος). Οι σπάνιες γαίες εμφανίζουν σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις στους βωξίτες και γι' αυτό δεν εξορύσσονται, αντιθέτως οι έρευνες εστιάζονται κυρίως στην συλλογή σπανίων γαιών μέσω έκπλυσης της ερυθράς ιλύος. Ωστόσο, σε σύγκριση με τα κοιτάσματα σπανίων γαιών του Mountain Pass που περιέχει 8,24% οξείδια σπανίων γαιών κατά μέσο όρο και βαθμό αποκοπής 5% ΟΣΓ, οι ελληνικοί βωξίτες και οι κόκκινες λάσπες έχουν συνήθως λιγότερο από 0,1% οξείδια σπανίων γαιών και βαθμό αποκοπής. Επιπλέον, οι ελληνικοί βωξίτες και οι κόκκινες λάσπες υστερούν σε αναλογίες σπανίων γαιών σε σύγκριση και με άλλους παρόμοιους πόρους σπανίων γαιών, όπως οι κόκκινες λάσπες της Τζαμάικα (0,23-0,38 κ.μ.% ΣΣΓ+Υ) ή τα κινεζικά εμπλουτισμένα κοιτάσματα ΒΣΓ (0,03-0,35% ΟΣΓ). Το υψηλό κόστος των οξέων που απαιτούνται για την έκπλυση καθώς και η χαμηλή περιεκτικότητα σε ΒΣΓ της ελληνικής κόκκινης λάσπης φαίνονται προβληματικά για μια οικονομικά εφικτή εξαγωγή σπανίων γαιών, για αυτό και εξετάζονται μέθοδοι έκπλυσης του βωξίτη πριν την διαδικασία Bayer, αν και βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο επίπεδο (60,62,79).

Στα θετικά είναι ότι, επειδή η περιοχή εξορύσσεται, δεν αντιμετωπίζει κοινωνικά προβλήματα και οι σπάνιες γαίες θα μπορούσαν να αποτελούν παραπροϊόν και ένα επιπρόσθετο έσοδο από την παραγωγή αλουμίνιου. Από την άλλη η κυβερνητική αστάθεια της Ελλάδος και η μη τόσο ισχυρή οικονομία ανεβάζει τον συντελεστή κινδύνου.

Αυτό που διαπιστώνεται στο τέλος της παραπάνω αξιολογήσεις είναι ότι τα ποσά των σπανίων γαιών είναι σχετικά μικρά, όμως με την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων διαχωρισμού πάνω στις υπάρχουσες εκμεταλλεύσεις βωξίτη ίσως να οδηγήσουν σε περαιτέρω έσοδα για την Αλουμίνιο Ελλάδος Α.Ε. και επιπλέον την είσοδο της Ελλάδας στην παγκόσμια αλυσίδα παραγωγής οξειδίων σπανίων γαιών (ΟΣΓ). Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα που επικεντρώνεται στον βελτιωμένο χαρακτηρισμό των φάσεων αποβλήτων βωξίτη και κόκκινης λάσπης, στην επιλεκτική εξόρυξη βωξιτών εμπλουτισμένων με σπάνιες γαίες και στην ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών ανάκτησης σπανίων γαιών από βωξίτες και κόκκινες λάσπες, για την πλήρη αξιολόγηση αυτών των δυνητικά σημαντικών πόρων, εφόσον οι μελέτες βρίσκονται ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο(77). Όλα τα παραπάνω την κατατάσσουν μεταξύ Δ.Ε=2 και 3.

Ανάστροφη δενδρική ανάλυση: Παρνασσός-Γκιώνα

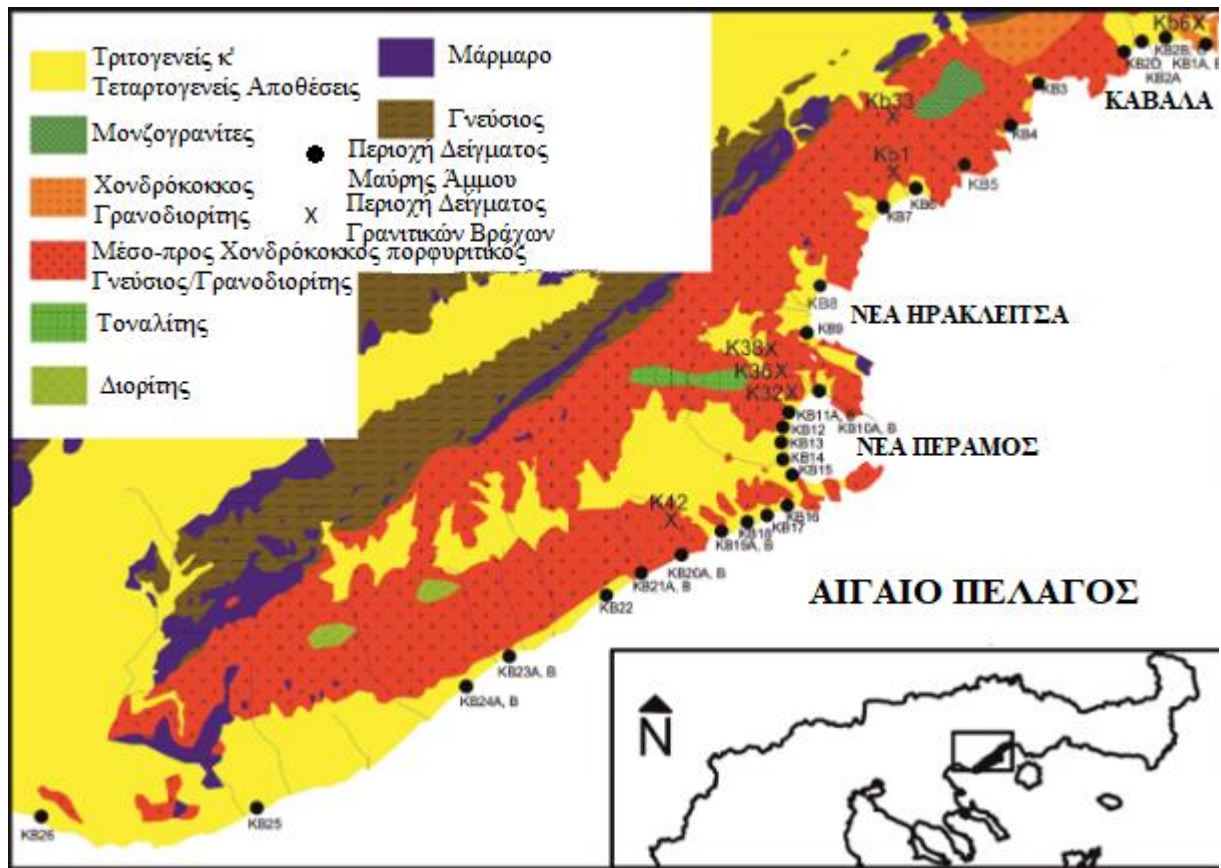


Εικόνα 18: Ανάστροφη δενδρική ανάλυση για την περιοχή βωξιτών στον Παρνασσό-Γκιώνα.

5.4 Καβάλα - Στρυμονικός Κόλπος

Η τελευταία περιοχή που εξετάζεται όσο αφορά την Ελλάδα και τις ΣΓ είναι η περιοχή της Καβάλας και του Στρυμονικού κόλπου. Τα προσχωματικά κοιτάσματα της περιοχής παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, εξαιτίας του σημαντικού εμπλουτισμού σε ΣΣΓ + Υ, σε σύγκριση με τις άλλες εμφανίσεις ΣΓ στην Ελλάδα. Σε μία ακτογραμμή με παράκτια άμμο των 240 χιλιομέτρων, οι υψηλότερες μετρήσεις σπανίων γαιών εντοπίζονται νοτιοδυτικά της Καβάλας μεταξύ Νέα Περάμου και Λουτρών Ελευθέρων σε μία περιοχή των 15 τετραγωνικών χιλιομέτρων (Εικόνα 19).

Τα ορυκτά συστατικά των πλουτώνιων πετρωμάτων της Καβάλας που καλύπτουν την εσωτερική υφαλοκρηπίδα Λουτρά Ελευθέρων-Νέας Περάμου αποτελούνται κυρίως από χαλαζία (~15-35%), πλαγιόκλαστο (~10-25%), Κ-άστριο (~5-20%) και ασβεστίτη (~5-20%), ενώ το αμφίβολο, ο βιοτίτης, τα πυροξένα και το επίδοτο εμφανίζονται σε μικρότερες ποσότητες. Τι-μαγνητίτης, ρουτίλιο, τιτανίτης, ιλμενίτης, ζirkόνιο, βαρίτης, απατίτης, πυρίτης και άργιλος εμφανίζονται ως βοηθητικές ορυκτές φάσεις (~5% συνολικά). Ο αλανίτης και σπανιότερα ο μοναζίτης και το ξενότιμο είναι τα ορυκτά φάσεις που έχουν ΣΓ, οι οποίες είναι κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια των ιζημάτων. (La~900 ppm, Ce~1000 ppm, Nd~ 300 ppm) Βρίσκονται ως λεπτόκοκκοι κρύσταλλοι άμμου, είτε με τη μορφή μονοκρυστάλλων ή εντός γρανιτικών θραυσμάτων, μαζί με χαλαζία και άστριο. Αλλανίτες έχουν αξιοσημείωτη περιεκτικότητα σε θόριο (έως 3,3%), ενώ οι μοναζίτες περιλαμβάνουν σχετικά υψηλές ποσότητες περιεκτικότητας ΣΓ και θορίου (ΣΣΓ+Th=44,43-62,65%)(80). Με βάση πετρογραφικές παρατηρήσεις, αναλύσεις χημείας ορυκτών, καθώς και ολόκληρου του πετρώματος εκτιμούν ποσότητες ορυκτών με ΣΓ εντός της άμμου μεταξύ 0,1 % κατά βάρος και 0,9 % κατά βάρος. Το τιτάνιο εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 40.000 τόνων και οι ΣΓ περίπου 100.000 τόνοι. Το αποθεματικό μεταλλευμάτων της μαύρης άμμου Ν.Περάμου-Λουτρών Ελευθέρων εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 3.600.000 τόνων(46).



Εικόνα 19 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Νέα Περάμου(Καβάλας) και τα σημεία δειγματοληψίας των εμφανίσεων(81).

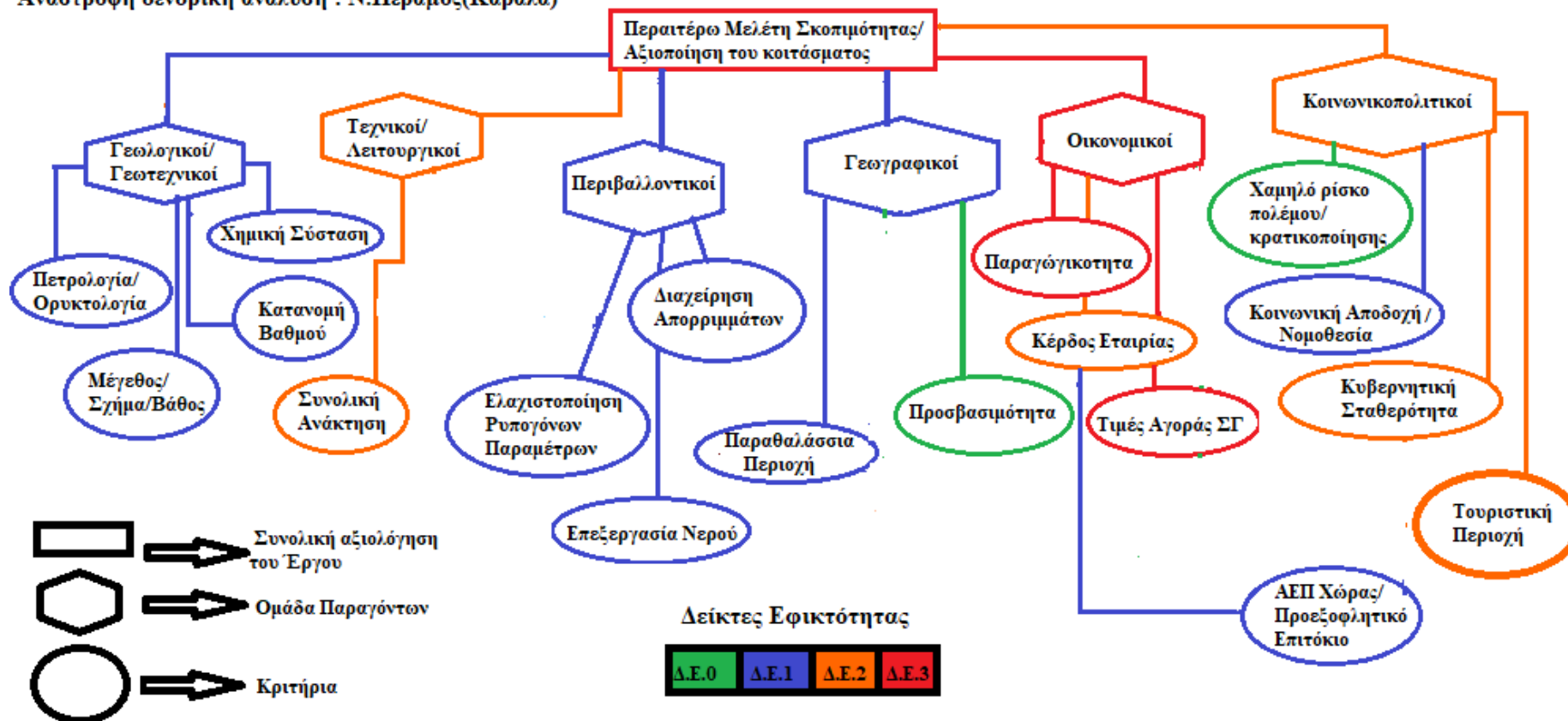
Από περιβαλλοντολογική άποψη, τα ορυκτά περιέχουν σημαντικές ποσότητες από τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία U και Th, τα οποία έχουν παρόμοια γεωχημικά χαρακτηριστικά με τις ΣΓ. Αυτό ενέχει έναν προφανή ραδιενεργό κίνδυνο, ένα θέμα που έχει ήδη συζητηθεί και σε άλλες μελέτες με ιδιαίτερη έμφαση στη φυσική ραδιενέργεια που εκπέμπεται από την παράκτια άμμο στην Ελλάδα και παραπομπές σε αυτό. Η ανησυχία για το περιβάλλον και την υγεία βρίσκεται επομένως στο επίκεντρο της οικονομίας των κοιτασμάτων ΣΓ, απαιτώντας έτσι μέτρα για τον περιορισμό των επιβλαβών περιβαλλοντικών και ανθρώπινων επιπτώσεων. Ταυτόχρονα, ο εγγενής εμπλουτισμός των κοιτασμάτων ΣΓ σε ραδιενεργά ορυκτά προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο για την εξερεύνηση τέτοιων κοιτασμάτων(64,82).

Κοινωνικά η περιοχή εκτός του ότι βρίσκεται σε κοντινούς οικισμούς, παρουσιάζει και τουριστικό ενδιαφέρον, όπως οι περισσότερες παραλίες στην Ελλάδα. Από την άλλη οποιαδήποτε εκμετάλλευση για ΣΓ εγκυμονεί κινδύνους περιβαλλοντικής αλλοίωσης της περιοχής και ίσως οδηγεί στην μείωση των συνολικών εσόδων της.

Εάν συνυπολογιστούν τα κοινωνικό- τουριστικά που υπάγεται η περιοχή μαζί με τα συνολικά προβλήματα που διατρέχουν τις εκμεταλλεύσεις των ΣΓ, όπως η οικονομικά αδύνατη

παραγωγή των τελικών προϊόντων των ΣΓ από την Ελλάδα και οι χαμηλοί τωρινοί βαθμοί ανάκτησης και διαχωρισμού μαζί με τα χαμηλής χωρητικότητας μεμονωμένες εμφανίσεις βαθμολογείται με Δ.Ε.=3

Ανάστροφη δένδρική ανάλυση : Ν.Πέραμος(Καβάλα)



Εικόνα 20: Ανάστροφη δένδρική ανάλυση για την περιοχή Ν.Πέραμος-Καβάλα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή, μετά την παρουσίαση ιστορικών δεδομένων, αλλά και πληροφοριών σχετικών με την ονοματολογία, χημική ταξινόμηση, γεωλογία και ορυκτολογία σχετικά με τις σπάνιες γαίες, αναδύονται χρήσιμα συμπεράσματα, πολλά εκ των οποίων αποτελούν βάση ανάπτυξης νέων ερευνητικών ερωτημάτων.

Οι εφαρμογές των ΣΓ έχουν ευρεία χρήση. Σήμερα είναι γνωστή ή χρησιμότητά τους στην δημιουργία καταλυτών με σκοπό τη πυρόλυση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου ή άλλων ρευστών παραγώγων του. Επίσης στην υαλουργία, στην στίλβωση, στην μεταλλουργία, στη κατασκευή κεραμικών και μαγνητών η χρήση των ΣΓ διαρκώς αυξάνεται. Μπαταρίες, οι οποίες έχουν υλικά από οξείδια σπάνιων γαιών όπως οι μπαταρίες υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH) χρησιμοποιούνται σε υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Φωσφόροι σπάνιων γαιών ενσωματώνονται στο εσωτερικό του γυάλινου τοιχώματος των λαμπτήρων φθορισμού ή λαμπτήρων εξοικονόμησης ενέργειας CFL με σκοπό την βελτίωση της απόδοσής τους. Στην ιατρική οι σπάνιες γαίες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, λόγω των μοναδικών τους ιδιοτήτων, όπως η ακτινοβολία και ο μαγνητισμός, που επιτρέπουν τη χρήση τους σε πολλές διαφορετικές θεραπευτικές και διαγνωστικές διαδικασίες. Στον στρατιωτικό τομέα οι σπάνιες γαίες ενσωματώνονται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές και τεχνολογίες, από γυαλιά νυχτερινής όρασης έως συστήματα καθοδήγησης πυραύλων. Στην γεωργία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή λιπασμάτων, ενώ στην έρευνα, ορυκτά που περιέχουν στοιχεία σπάνιων γαιών χρησιμοποιούνται ευρέως για γεωχρονολογήσεις. Όλες αυτές οι εφαρμογές έχουν αυξήσει τις παγκόσμιες ανάγκες σε ΣΓ κατά 40% την περίοδο 2013-2019. Τη τελευταία διετία, η αυξανόμενη ανάγκη κατασκευής μπαταριών, χρήσης μαγνητών, καθώς και οι νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται λόγω της ενεργειακής μετάβασης ή λόγω κατασκευής εξελιγμένων πυραυλικών οπλικών συστημάτων, αναμένεται να αυξήσουν ακόμη περισσότερο την παγκόσμια ζήτησή τους.

Στον παγκόσμιο χάρτη, η χώρα που πρωτοστατεί τόσο στην εξόρυξη, όσο και στην επεξεργασία μεταλλευμάτων για την απομόνωση των ΣΓ είναι η Κίνα. Εκτός από τις ορυκτολογικές δυνατότητες, γεωλογία και γεωγραφία του εδάφους, σημαντικό ρόλο παίζει το νομικό και κοινωνικό πλαίσιο που περιβάλλει την υπό εκμετάλλευση περιοχή. Επίσης, τόσο η εξορυκτική δυνατότητα, όσο και η διαδικασία απομόνωσης των ΣΓ υπόκεινται και ελέγχονται από σειρά

οικονομικών, περιβαλλοντικών, στρατηγικών και κοινωνικοπολιτικών παραμέτρων, διαφορετικών στα κράτη που εμπλέκονται, και επηρεάζουν έτσι τα ποσοτικά μεγέθη εξόρυξης/απομόνωσης. Η προσπάθεια διατύπωσης και ταξινόμησης κριτηρίων αξιολόγησης για εξορύξεις ΣΓ αποκτά σήμερα όλο και μεγαλύτερη αξία για τις υποψήφιες προς εκμετάλλευση περιοχές.

Χρησιμοποιώντας τέτοια κριτήρια αξιολόγησης και βασισμένοι στην εμπειρία αξιολόγησης σε παγκόσμιο επίπεδο, γίνεται εστιασμός στη συγκριτική ανάλυση των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης γεωλογικών σχηματισμών που εμπεριέχουν σπάνιες γαίες στον Ευρωπαϊκό και Ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στις περιοχές Norra Kärr που βρίσκεται στη νοτιοκεντρική Σουηδία, το Kvanefjeld στην νότια Γροιλανδία δίπλα στην πόλη Narsaq, και στις περιοχές Βωξίτη στον Παρνασσό -Γκιώνα στη Στερεά Ελλάδα και στη περιοχή Περάμου και Στρυμονικού κόλπου στη ευρύτερη περιοχή Καβάλας. Τα αποτελέσματα για μελλοντική εξόρυξη και απομόνωση ΣΓ στο Norra Kärr είναι μη επιτρεπτά με τους ισχύοντες περιβαλλοντολογικούς, οικονομικούς και κοινωνικοπολιτικούς περιορισμούς, ενώ στο Kvanefjeld οι περιορισμοί είναι κυρίως περιβαλλοντολογικοί και κοινωνικοπολιτικοί. Σε μεγαλύτερο επίπεδο δυσκολίας βρίσκονται οι δύο περιοχές στη Ελλάδα όπου εκτός από τους παραπάνω περιορισμούς υπάρχουν και περιορισμοί σχετικά με την ορυκτολογία και γεωλογία των υποψηφίων προς εκμετάλλευση εδαφών.

Η ανάλυση εκμετάλλευσης ΣΓ στις παραπάνω περιοχές, με παράλληλη αναφορά των προοπτικών ή/και δυνατοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο, προσφέρει πολύτιμη πληροφορία στις προσπάθειες μελλοντικών σχεδιασμών εξόρυξης και απομόνωσης των ΣΓ. Στα πρόσφατα ελπιδοφόρα αποτελέσματα στην Kiruna και στο Gällivare της Σουηδίας, που παρουσιάστηκαν την άνοιξη 2022, (το κοίτασμα ήταν γνωστό από το 1990), η χρησιμοποίηση αλγοριθμικών κριτηρίων ταξινόμησης θα επέτρεπε την ασφαλέστερη αξιολόγηση της μελλοντικής εκμετάλλευσής τους.

Με τις αυξανόμενες δυνατότητες εφαρμογών των ΣΓ, αναδύεται επιτακτικά η ανάγκη επιτάχυνσης της τεχνολογικής προόδου στην κατεύθυνση της επίλυσης προβλημάτων εξόρυξης και εξαγωγής σπανίων γαιών, προς όφελος της ανθρώπινης προόδου και ευημερίας, αναδεικνύοντας συγχρόνως την ανάγκη σεβασμού στο περιβάλλον και της παγκόσμιας ειρήνης και συνεργασίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Rare earths | Institute for Rare Earths and Metals. Institut für Seltene Erden und strategische Metalle e.V. Available from: <https://en.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/seltene-erden/>
2. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019 Jul 1;10(4):1285–303.
3. Scientific Investigations Report 2011–5094. Available from: <https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/>
4. Rare Elements of Security. *Air & Space Forces Magazine*. Available from: <https://www.airandspaceforces.com/article/rare-elements-of-security/>
5. Hatch GP. Dynamics in the Global Market for Rare Earths. *Elements*. 2012 Oct 1;8(5):341–6.
6. Laudal DA. Evaluation Of Rare Earth Element Extraction From North Dakota Coal-Related Feed Stocks.
7. National Minerals Information Center. U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2022 Data Release. Available from: <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/6197ccbed34eb622f692ee1c>
8. Golroudbary SR, Makarava I, Kraslawski A, Repo E. Global environmental cost of using rare earth elements in green energy technologies. *Science of The Total Environment*. 2022 Aug 1;832:155022.
9. Barakos G, Mischo H, Gutzmer J. How potential mines can connect to the global REE market.
10. Nomenclature of Inorganic Chemistry – IUPAC Recommendations 2005. *Chemistry International -- Newsmagazine for IUPAC* Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ci.2005.27.6.25/html>
11. Barakos G. An assessment tool for the mineability of rare earth element deposits. 1. Auflage. Freiberg: Technische Universität Bergakademie; 2017. 287 p. (Berichte der Professur für Rohstoffabbau und Spezialverfahren unter Tage).
12. Jaireth S, Hoatson D, Mieizitis Y. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*. 2014 Oct 1;62:72–128.
13. May E, Thoennessen M. Discovery of cesium, lanthanum, praseodymium and promethium isotopes. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 2012 Sep 1;98(5):960–82.

14. Binnemans K, Jones PT. Rare Earths and the Balance Problem. *J Sustain Metall.* 2015 Mar 1;1(1):29–38.
15. Zepf V. Rare Earth Elements: What and Where They Are. In: Zepf V, editor. *Rare Earth Elements: A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. p. 11–39. (Springer Theses). Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8_2
16. Voncken JHL. The Rare Earth Elements—A Special Group of Metals. In: Voncken JHL, editor. *The Rare Earth Elements: An Introduction* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 1–13. (SpringerBriefs in Earth Sciences). Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5_1
17. McLing T, Smith W, Smith R. Utilizing Rare Earth Elements as Tracers in High TDS Reservoir Brines in CCS Applications. *Energy Procedia.* 2014 Jan 1;63:3963–74.
18. Marsh JK. 30. The place of yttrium and the application of ferricyanide precipitation in the rare-earth group. The purification of erbium. *J Chem Soc.* 1947 Jan 1;(0):118–22.
19. Haque N, Hughes A, Lim S, Vernon C. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources.* 2014 Dec;3(4):614–35.
20. Yang XJ, Lin A, Li XL, Wu Y, Zhou W, Chen Z. China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development.* 2013 Oct 1;8:131–6.
21. Clark AM. Chapter 2 - Mineralogy of the Rare Earth Elements. In: Henderson P, editor. *Developments in Geochemistry* p. 33–61. (Rare Earth Element Geochemistry; vol. 2). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444421487500071>
22. Long K, Gosen B, Foley N, Cordier D. The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. Vol. 9, *Cultural Analysis: An Interdisciplinary Forum on Folklore and Popular Culture.* 2010. 96 p.
23. Wall F. Rare earth elements. In: *Critical Metals Handbook* [Internet]. 2014. p. 312–39. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118755341.ch13>
24. Castor SB, Hedrick JB. Rare Earth Elements. *Industrial Minerals and Rocks.*
25. GREINACHER E. History of Rare Earth Applications, Rare Earth Market Today. In: *Industrial Applications of Rare Earth Elements* [Internet]. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY; 1981. p. 3–17. (ACS Symposium Series; vol. 164). Available from: <https://doi.org/10.1021/bk-1981-0164.ch001>
26. Evans CH. Episodes from the History of the Rare Earth Elements. Springer Science & Business Media; 2012. 255 p.
27. Jha AR (Author). *Rare Earth Materials : Properties and Applications.*
28. Mancheri N, Ialithasundaresan, Chandrashekar S. *Dominating the World China and the Rare Earth Industry.* 2013.

29. Mancheri NA. World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications. *Resources Policy*. 2015 Dec 1;46:262–71.
30. Seaman J. Rare Earths and China: A Review of Changing Criticality in the New Economy.
31. Bleiwas DI, Gambogi J. Preliminary estimates of the quantities of rare-earth elements contained in selected products and in imports of semimanufactured products to the United States, 2010 [Internet]. Preliminary estimates of the quantities of rare-earth elements contained in selected products and in imports of semimanufactured products to the United States, 2010. Reston, VA: U.S. Geological Survey; p. 18. (Open-File Report; vols 2013–1072). Report No.: 2013–1072. Available from: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20131072>
32. Editor NA Contributing. A New Spin: Thin-Disc Yb:YAG Lasers . Available from: https://www.photonics.com/Articles/A_New_Spin_Thin-Disc_YbYAG_Lasers/a14119
33. Binnemans K, Jones PT, Blanpain B, Van Gerven T, Yang Y, Walton A, et al. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2013 Jul;51:1–22.
34. Charalampides G, Vatalis KI, Apostoplos B, Ploutarch-Nikolas B. Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance*. 2015;24:126–35.
35. Alonso E, Sherman AM, Wallington TJ, Everson MP, Field FR, Roth R, et al. Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environ Sci Technol*. 2012 Mar 20;46(6):3406–14.
36. Binnemans K, Jones PT, Müller T, Yurramendi L. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *J Sustain Metall*. 2018 Mar 1;4(1):126–46.
37. Allawadhi P, Khurana A, Allwadhi S, Joshi K, Packirisamy G, Bharani KK. Nanocerium as a possible agent for the management of COVID-19. *Nano Today*. 2020 Dec;35:100982.
38. Giri S, Karakoti A, Graham RP, Maguire JL, Reilly CM, Seal S, et al. Nanocerium: A Rare-Earth Nanoparticle as a Novel Anti-Angiogenic Therapeutic Agent in Ovarian Cancer. Batra SK, editor. *PLoS ONE*. 2013 Jan 31;8(1):e54578.
39. Grasso VB. Rare Earth Elements in National Defense: Background, Oversight Issues, and Options for Congress.
40. Gieré R, Sorensen SS. Allanite and Other REE-Rich Epidote-Group Minerals.
41. Gupta CK, Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of rare earths. Boca Raton, Fla: CRC Press; 2005. 484 p.
42. Pecht MG, Kaczmarek RE, Song X, Hazelwood DA, Kavetsky RA, Anand DK. Rare Earth Materials: Insights and Concerns.
43. Castor SB. THE MOUNTAIN PASS RARE-EARTH CARBONATITE AND ASSOCIATED ULTRAPOTASSIC ROCKS, CALIFORNIA. *The Canadian Mineralogist*. 2008 Aug 1;46(4):779–806.

44. NI43-101Pre-Feasibility Study Report. Available from:
http://www.rareelementresources.com/App_Themes/NI43-101PreFeasibilityStudyReport/HTML/files/assets/basic-html/../../index.html
45. Clay AN, Conquest SE, Greyling E de V, McKenna N, Telfer CA, Rand V. Venmyn Ref: D1115R Effective Date: 1st October 2012 Report Date: 12th October 2012. 2012;
46. EURARE IKMS (Integrated Knowledge Management System). Available from:
<http://eurare.brgm-rec.fr/>
47. Gunter C. The Case for Uranium Mining in Greenland. 2015;48.
48. Goodenough KM, Schilling J, Jonsson E, Kalvig P, Charles N, Tuduri J, et al. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*. 2016 Jan 1;72:838–56.
49. ERES 2017 conference | Event [Internet]. CORDIS | European Commission. Available from: <https://cordis.europa.eu/event/id/143883-eres-2017-conference>
50. Final Report Summary - EURARE (Development of a sustainable exploitation scheme for Europe's Rare Earth ore deposits) | FP7 [Internet]. CORDIS | European Commission. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/309373/reporting>
51. Marien C, Dijkstra AH, Wilkins C. The hydrothermal alteration of carbonatite in the Fen Complex, Norway: mineralogy, geochemistry, and implications for rare-earth element resource formation. *Mineralogical Magazine*. 2018 May;82(S1):S115–31.
52. Ahonen S, Arvanitidis N, Auer A, Baillet E, Bellato N, Binnemans K, et al. STRENGTHENING THE EUROPEAN RARE EARTHS SUPPLY-CHAIN Challenges and policy options A REPORT BY THE EUROPEAN RARE EARTHS COMPETENCY NETWORK (ERECON). Working Papers [Internet]. 2015 Jun 19 [cited 2023 Jan 13]; Available from: <https://ideas.repec.org/p/hal/wpaper/cea-01550114.html>
53. EJOLT. Norra Kärr, near lake Vättern, Sweden | EJAtlas [Internet]. Environmental Justice Atlas. Available from: <https://ejatlas.org/conflict/norra-karr-norra-karr-sweden-mining-conflict>
54. Barakos G, Mischo H. Insertion of the social license to operate into the early evaluation of technical and economic aspects of mining projects: Experiences from the Norra Kärr and Bokan Dotson rare earth element projects. *The Extractive Industries and Society*. 2021 Jun 1;8(2):100814.
55. Adamas Intelligence - Independent research and advisory services [Internet]. Adamas Intelligence. Available from: <https://www.adamasintel.com/>
56. AFP. Europe's largest rare earths deposit discovered in Sweden [Internet]. Insider Paper. 2023. Available from: <https://insiderpaper.com/europes-largest-rare-earths-deposit-discovered-in-sweden-mining-firm/>
57. Europe's largest deposit of rare earth metals is located in the Kiruna area [Internet]. LKAB. Available from: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>

58. Σουηδία, Κιρούνα: Η LKAB ανακοίνωσε νέο κοιτάσμα σπάνιων γαιών, πιθανώς το μεγαλύτερο στην Ευρώπη. Ελληνικός Ορυκτός Πλούτος. 2023. Available from: <https://www.oryktosploutos.net/2023/01/σουηδία-κιρούνα-η-lkab-ανακοίνωσε-νέο-κο/>
59. Eliopoulos D, Economou G, Tzifas I, Papatrechas C. THE POTENTIAL OF RARE EARTH ELEMENTS IN GREECE.
60. Mouchos E. A Geological Study of the Potential for Rare Earth Element By-Product Recovery from Greek Bauxite Deposits.
61. Melfos V, Voudouris PCh. Geological, Mineralogical and Geochemical Aspects for Critical and Rare Metals in Greece. Minerals. 2012 Oct 19;2(4):300–17.
62. Gamaletsos PN, Godelitsas A, Filippidis A, Pontikes Y. The Rare Earth Elements Potential of Greek Bauxite Active Mines in the Light of a Sustainable REE Demand. J Sustain Metall. 2019 Mar;5(1):20–47.
63. Σταθογιάννη Φωτεινή. Κατανομή σπανίων γαιών σε μεταμορφωμένα πετρώματα της Κεντρικής Κρήτης. Available from: <https://dias.library.tuc.gr/view/13582>
64. Papadopoulos A, Tzifas I, Tsikos H. The Potential for REE and Associated Critical Metals in Coastal Sand (Placer) Deposits of Greece: A Review. Minerals. 2019 Jul 31;9:469.
65. The most important thing to come out of a mine is the miner.docx - ‘The most important thing to come out of a mine is the miner.’ Frédéric Le Play | Course Hero. Available from: <https://www.coursehero.com/file/120008195/The-most-important-thing-to-come-out-of-a-mine-is-the-minerdocx/>
66. Stefanakis M. S&B* Mining Stewardship in Milos Island. Bulletin of the Geological Society of Greece. 2018 Oct 4;53(1):50–63.
67. Leading Edge Materials Announces Positive Preliminary Economic Assessment Results for its Norra Karr REE Project With US\$1,026M Pre-tax NPV(10%) And 30.8% Pre-tax IRR. Available from: <https://leadingedgematerials.com/leading-edge-materials-announces-positive-preliminary-economic-assessment-results-for-its-norra-karr-ree-project-with-us1026m-pre-tax-npv10-and-30-8-pre-tax-irr/>
68. Leading Edge Materials Announces Positive Preliminary Economic Assessment Results for its Woxna Graphite Anode Project With US\$317m Pre-Tax NPV and 42.9% Pre-Tax IRR. Available from: <https://leadingedgematerials.com/leading-edge-materials-announces-positive-preliminary-economic-assessment-results-for-its-woxna-graphite-anode-project-with-us317m-pre-tax-npv-and-42-9-pre-tax-irr/>
69. Kogarko LN. Geochemistry of Rare Earth Metals in the Ore Eudialyte Complex of the Lovozero Rare Earth Deposit. Dokl Earth Sc. 2020 Apr 1;491(2):231–4.
70. Leading Edge Materials to Apply for Natura 2000 Permit and Retracts Appeal Against Mining Lease Rejection for Norra Karr. Available from: <https://leadingedgematerials.com/leading-edge-materials-to-apply-for-natura-2000-permit-and-retracts-appeal-against-mining-lease-rejection-for-norra-karr/>

71. Gamboa JRC. RARE-EARTH MINING AND SOVEREIGN STATEHOOD IN GREENLAND: ‘SUSTAINABLE ENGAGEMENT’ WITH EXTRACTIVISM AT KVANEFJELD.
72. Sørensen H, Bailey JC, Hansen JR. The emplacement and crystallization of the U–Th–REE-rich agpaitic and hyperagpaitic lujavrites at Kvanefjeld, Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland. *bgsd*. 2011 Oct 28;59:69–92.
73. Company Reports • Energy Transition Minerals [Internet]. Energy Transition Minerals. Available from: <https://etransmin.com/company-reports/>
74. ASX Announcements • Energy Transition Minerals [Internet]. Energy Transition Minerals.. Available from: <https://etransmin.com/asx-announcements/>
75. Henriques I, Böhm S. The perils of ecologically unequal exchange: Contesting rare-earth mining in Greenland. *Journal of Cleaner Production*. 2022 May 15;349:131378.
76. A new Cold War: mining geopolitics in the Arctic circle - Mine | Issue 98 | November 2020. Available from: https://mine.nridigital.com/mine_nov20/arctic_mining_geopolitics
77. Mouchos E, Wall F, Williamson BJ, Palumbo-Roe B. EASILY LEACHABLE RARE EARTH ELEMENT PHASES IN THE PARNASSUS-GIONA BAUXITE DEPOSITS, GREECE. *geosociety*. 2016 Jul 28;50(4):1952–8.
78. Dedy ÉA, Mouchos E, Goodenough K, Williamson BJ, Wall F. A review of the potential for rare-earth element resources from European red muds: examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece. *Mineralogical Magazine*. 2016 Feb;80(1):43–61.
79. Agrawal S, Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review. *Minerals Engineering*. 2021 Sep 1;171:107084.
80. Panagiotopoulos IP, Kapsimalis V, Ioakim Chr, Karageorgis A, Rousakis G, Morfis I, et al. HIGH-RESOLUTION GEOMORPHOLOGICAL MAPPING OF THE SHALLOW CONTINENTAL SHELF WEST OF THE KAVALA BAY, NORTH AEGEAN. *geosociety*. 2017 Jul 27;50(1):448.
81. Papadopoulos A, A. K, Christofides G, Stoulos S. Natural radioactivity distribution and gamma radiation exposure of beach sands close to Kavala pluton, Greece. *Open Geosciences*. 2015 Jan 13;7.
82. Tzifas IT, Papadopoulos A, Misaelides P, Godelitsas A, Göttlicher J, Tsikos H, et al. New insights into mineralogy and geochemistry of allanite-bearing Mediterranean coastal sands from Northern Greece. *Geochemistry*. 2019 May 1;79(2):247–67.
83. Roskill. (2015). Rare earths: Market outlook to 2020, 15th edition, London: U.K. 337 p